

FVEE-Themen



Forschung für die Wärmewende

Beiträge zur FVEE-Jahrestagung 2015



FVEE • Themen 2015

Forschung für die Wärmewende

Jahrestagung 2015

des ForschungsVerbunds Erneuerbare Energien

3. und 4. November 2015

Umweltforum Berlin • Pufendorfstr. 11 • 10249 Berlin

Wissenschaftliche Leitung

Prof. Dr. Vladimir Dyakonov • ZAE Bayern

Programmkomitee

DBFZ • Prof. Dr. Daniela Thrän

DLR • Prof. Dr. André Thess • Dr. Stephan Saupe

Fraunhofer IBP • Dr. Dietrich Schmidt

Fraunhofer ISE • Prof. Dr. Hans-Martin Henning

Fraunhofer IWES • Prof. Dr. Clemens Hoffmann • Dr. Stefan Bofinger

GFZ • Prof. Dr. Ernst Huenges

HZB • Prof. Dr. Martha Ch. Lux-Steiner

ISFH • Prof. Dr. Rolf Brendel

IZES gGmbH • Juri Horst

FZ Jülich • Dr. Bernd Emonts

Wuppertal Institut • Prof. Dr. Manfred Fishedick • Dietmar Schüwer

ZAE Bayern • Dr. Hans-Peter Ebert

ZSW • Tobias Kelm



Veranstalter



Schirmherrschaft und
Förderung

■ Einführung

5 Forschung rückt die Wärmewende in den Mittelpunkt

Prof. Dr. Vladimir Dyakonov • ZAE Bayern

■ Politische Rahmenbedingungen

6 Grußwort des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie

Dr. Georg Menzen • BMWi

8 Grußwort des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit

MinDir Günther Hoffmann • BMUB

11 Grußwort des Bundesministeriums für Bildung und Forschung

MinDirig Wilfried Kraus • BMBF

■ Wärme im Energiesystem

14 Die Rolle der Wärme im Energiesystem: Systemaspekte

Prof. Dr. Manfred Fischedick • Wuppertal Institut

19 Die Rolle der Wärme im Energiesystem: Wärmespeicher als Schlüsselkomponente isentroper Energiespeicher

Prof. Dr. André Thess • DLR

23 Besonderheiten des Wärmemarktes und Konsequenzen für eine erfolgreiche Wärmewende

Gerhard Stryi-Hipp • Fraunhofer ISE

27 Wirtschaftliche und technische Aspekte der Dekarbonisierung des Wärmesektors

Dr. Kurt Rohrig • Fraunhofer IWES

32 Treiber und Hemmnisse für die Wärmewende – die Rolle der Kommunen

Prof. Frank Baur • IZES

37 Geschäftsmodelle für die Wärmewende

Tobias Kelm • ZSW

■ Zur Jubiläumsfeier 25 Jahre ForschungsVerbund

42 Die Entwicklung der erneuerbaren Energien

*Prof. Dr. Dr. Klaus Töpfer • Exekutivdirektor a. D. des Umweltprogramms der UN und
Gründungsdirektor des IASS*

45 Gemeinsam Forschen für die Energie der Zukunft – Rückblick auf 25 Jahre ForschungsVerbund Erneuerbare Energien

*Prof. Dr. Clemens Hoffmann • FVEE-Sprecher 2015, Institutsleiter Fraunhofer IWES Kassel
Dr. Gerd Stadermann • Ehem. Geschäftsführer des FVEE
Dr. Wolfhart Dürschmidt • MinRat a.D. • Ehem. Referatsleiter im Bundesumweltministerium
Prof. Dr. Joachim Luther • Ehem. Leiter des Fraunhofer ISE*

■ Wärmeeffizienz in den Nutzungssektoren

50 Effiziente Wärme- und Kälteversorgung für Gewerbe, Handel und Dienstleistung

Dr. Doreen Kalz • Fraunhofer ISE

55 Effiziente Wärmesysteme für Wohngebäude

Dr. Raphael Niepelt • ISFH

61 Wärme und Effizienz für die Industrie

Dr. Alexander Otto • Jülich

66 Wärmewende im Quartier

Dr. Dietrich Schmidt • Fraunhofer IBP

■ Effizienzkomponenten für die Wärmewende

70 Chancen und Potenziale innovativer Wärmedämmung

Dr. Hans-Peter Ebert • ZAE Bayern

75 Thermische Energiespeicher als sektorenübergreifende Querschnittstechnologie

Dr. Antje Wörner • DLR

80 Wärmepumpen im zukünftigen Strom- und Wärmesektor

Dr. Marek Miara • Fraunhofer ISE

85 Materialforschung für die Wärmewende

Dr. Klaus Habicht • HZB

■ Wärmebereitstellung aus erneuerbaren Energien für die Wärmewende

91 Tiefengeothermie als Grundlastwärmequelle in der Metropolregion München

Prof. Dr. Inga Moeck • Leibniz-Institut für Angewandte Geophysik

94 Solare Wärme: Bedeutung, Potenzial, Forschungsaufgaben

Dr. Federico Giovannetti • ISFH

103 Effiziente Wärme aus Biomasse – Stand, Herausforderungen und Perspektiven

Dr. Volker Lenz • DBFZ

■ Der ForschungsVerbund Erneuerbare Energien

109 Standorte der FVEE-Mitgliedsinstitute

110 Mitgliedsinstitute und Ansprechpartner

111 Impressum

Einführung

Forschung rückt die Wärmewende in den Mittelpunkt

Die Energiewende im Wärmesektor ist kein Selbstläufer und kommt zu langsam voran. Das ist alarmierend, da der Wärme-/Kältesektor für über die Hälfte des Endenergiebedarfs verantwortlich ist. Dass die „Wärmewende“ trotz vielerlei Bemühungen von Politik, Industrie und Forschung in den letzten Jahren kaum Fahrt aufgenommen hat, ist Anlass für die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler der FVEE-Institute, die Perspektiven der erneuerbaren Energien und der notwendigen Effizienzsteigerung im Wärmesektor systematisch zu untersuchen. Die FVEE-Jahrestagung 2015 steht deshalb unter dem Leitthema „Forschung für die Wärmewende“.

Forschung zeigt, wie die Wärmewende beschleunigt werden kann

Der Wärmemarkt zeichnet sich durch eine hohe Heterogenität und Komplexität aus. Das betrifft sowohl die Technologien, als auch die Investoren und Anwendungen. Man kann ihn dennoch mit einem gekoppelten Bündel von Maßnahmen erfolgreich stimulieren. Forschung spielt dabei eine wichtige Rolle, weil das Innovationspotenzial bei den erneuerbaren Wärmetechniken sehr groß ist und sie so konkurrenzfähiger werden.

Neben den technischen Einzellösungen geht es auch um eine Optimierung des gesamten Energiesystems, in dem sich die verschiedenen erneuerbaren Energien über die Sektorengrenzen hinweg sinnvoll ergänzen. Auch alle jetzt zu startenden Aktivitäten im Wärmesektor brauchen diese systemische Herangehensweise.

Die Beiträge dieses Tagungsbandes präsentieren aktuelle Forschungsergebnisse und zeigen Wege auf, um die Wärmewende technisch, wirtschaftlich und politisch umzusetzen kann. Sie widmen sich den Treibern aber auch den Hemmnissen der Wärmewende. Die Autoren berichten über innovative Projekte, die Gebäude und Industrie mit Wärme aus Geothermie, Biomasse und Solarthermie versorgen. Mehrere Beiträge widmen sich der Anwendung von Effizienzkomponenten, wie Wärmedämmung, thermischen Speichern und Wärmepumpen.

Der FVEE fordert auf seiner Jahrestagung außerdem mehr Engagement der Politik im Wärmesektor – sowohl durch den Ausbau von Forschung und Entwicklung als auch durch verbesserte Rahmenbedingungen für die beschleunigte Einführung von erneuerbaren Energien und Energieeffizienz.

25. Jubiläum des Forschungsverbunds Erneuerbare Energien

2015 feiert der ForschungsVerbund sein 25jähriges Bestehen und blickt auf die bewegte Geschichte der Energieforschung zurück, die sich stets im engen Verhältnis mit der Energie- und Forschungspolitik entwickelte. Wir freuen uns, dass wir Herrn Prof. Dr. Klaus Töpfer als Festredner der FVEE-Jahrestagung 2015 gewinnen konnten. Herr Töpfer war im Gründungsjahr des Forschungsverbunds 1990 Bundesumweltminister und hat die seitdem vollzogene, beeindruckende Entwicklung der Energieforschung eng begleitet.

Dank

Wir danken allen Referentinnen und Referenten für ihre Beiträge und dem Bundesministerium für Wirtschaft und Energie für die Schirmherrschaft und Förderung der Tagung.



Prof. Dr. Vladimir Dyakonov
 Wissenschaftlicher Tagungsleiter
 ZAE Bayern
 vladimir.dyakonov@zae-bayern.de

Grußwort des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie



BMWi
Bundesministerium für
Wirtschaft und Energie
Dr. Georg Menzen
georg.menzen@bmwi.bund.de

Sehr verehrte Damen und Herren,
meinen Beitrag möchte ich in drei Teile gliedern:

1. Rückblick zeigt Notwendigkeit der Forschung

Gestatten Sie mir einen persönlichen Rückblick. Meine ersten Begegnungen mit der Energieforschung hatte ich während meines Physikstudiums, bei dem während meiner Diplomarbeit die Seminare anfangs teilweise sehr theoretisch waren. Das änderte sich aber, als einer der Professoren eine Physiker-Tagung in Tübingen besuchte, auf der Bundeskanzler Helmut Schmidt die Professoren aufforderte, sich mit Themen zu beschäftigen, „die die Menschheit interessieren“. Fortan wurden praxisorientierte Seminare zum Beispiel zum Thema Energie angeboten.

Seitdem begleitet mich, schon seit nahezu 35 Jahren, das Thema Energieforschung mit vielen Höhen und Tiefen. In diesem Jahr stehen wir vor der entscheidenden Klimakonferenz in Paris und hoffen, damit einen wesentlichen Schritt in Sachen Klimaschutz voranzukommen. In weiteren 35 Jahren befinden wir uns im Jahr 2050, der Zielmarke der Energiewende. Die eigentliche Herausforderung, um die von der Bundesregierung gesetzten Ziele zu erreichen, liegt noch vor uns.

Die Arbeit der Energieforschung muss sich auch in den nächsten Jahren mit hohem Engagement fortsetzen, damit wir bis zum Jahr 2050 ein Energiesystem mit höchster Effizienz erreichen. Dieses System soll erneuerbare Energie intensiv nutzen, Speicher integrieren und dabei die gleiche Zuverlässigkeit aufweisen, die wir heute gewohnt sind. Auch die Kosten sollen sich auf einem ähnlichen Niveau bewegen.

Das sind Herausforderungen, die die Problemstellungen der vergangenen 35 Jahre deutlich übersteigen, und uns vor die Aufgabe stellen, angemessene Lösungen zu finden.

Zur Erreichung der Energiewende sind technologische Innovationen in erheblichem Umfang erforderlich und diese können nur durch Investitionen, Forschung und Entwicklung generiert werden.

2. Energieforschungsprogramm der Bundesregierung

In der aktuellen Legislaturperiode kamen einige Überlegungen und Vorschläge zur Weiterentwicklung des Energieforschungsprogrammes auf. Eine zentrale Rolle spielt die zunehmende Komplexität des zukünftigen Energiesystems, weshalb es notwendig ist, die Systemzusammenhänge stärker anzugehen und begreifen zu lernen. Die Einzelkomponenten des Energiesystems sind im Wesentlichen vorhanden. Somit gewinnt der Systemgedanke mehr und mehr eine zentrale Bedeutung, da wir das Gesamtziel der Energiewende nur mit der effizienten Kombination der verschiedenen Komponenten erreichen können.

Zu diesem Zweck hat das Bundeswirtschaftsministerium einige Schritte unternommen. Zum Beispiel die Zusammenlegung der Forschungsaktivitäten zu den Themen „Energieeffizienz“ und „Erneuerbare Energien“, um übergreifende Fragen wie „Speicherung“ und „Netze“ in Zukunft am BMWi noch intensiver und effizienter bearbeiten zu können.

Ein weiterer zentraler Aspekt ist die Zusammenarbeit auf europäischer und internationaler Ebene. Deutschland ist in Bezug auf die Forschungsinfrastruktur und die Forscher- und Ingenieursdichte das führende Land in Europa. Doch die Komplexität der Fragestellungen in der Forschung wird weiter zunehmen und damit wird die europäische Zusammenarbeit immer wichtiger werden.

International arbeiten viele Volkswirtschaften daran, für ihre Menschen größeren Wohlstand – ähnlich wie in Europa – zu erreichen. Dafür brauchen Volkswirtschaften eine zuverlässige Energieversorgung. Somit ist eine Intensivierung der internationalen Zusammenarbeit notwendig, um Technologien zu entwickeln, die auch außerhalb Europas zum Einsatz kommen können. So wird zur Zeit beispielsweise die Mission Innovation, ein Zusammenschluss von rund 20 Ländern, zur Verstärkung der internationalen Zusammenarbeit bei Forschung und Innovation von sauberen Energietechnologien vorbereitet, die auf der Klimakonferenz in Paris gestartet werden soll.

3. Forschung für die Wärmewende

In der öffentlichen Debatte spielen sowohl die Effizienz als auch die Wärme bis heute keine angemessenen große Rolle. Hier besteht ein Nachholbedarf, der von der Bundesregierung nun aufgegriffen wurde.

In der Energieforschung hingegen sind die Themen „Wärme“ und „Effizienz“ bereits in den letzten Jahren stärker in den Fokus gerückt. Gerade zum Thema „Effizienz in der Industrie“ haben wir die Forschungsmaßnahmen erheblich ausgeweitet.

Auch im Gebäudesektor hat das BMWi seine Aktivitäten verstärkt. Wir wissen, wie man ein neues Gebäude effizient errichten kann. Auch bei der Sanierung verfügen wir über gute Kenntnisse, wie man den Gebäudebestand energieeffizienter gestalten kann. Der nächste Schritt wird nun sein, nicht nur das einzelne Gebäude sondern ein gesamtes Quartier in den Blick zu nehmen. Das Ziel muss sein, bestehende verschiedenartige technische Konzepte und unterschiedliche Gebäudestrukturen zu einem effizienten Gesamtsystem zusammenzuschließen.

Auch die Solarenergie muss stärker in die Gebäude integriert werden. Dazu haben wir am BMWi einen ersten Schritt unternommen. In dem in der letzten Zeit eingerichteten Forschungsnetzwerk „Energie in Gebäuden und Quartieren“ spielt das Thema „Niedertemperatur-Solarthermie“ eine prominente Rolle. In dem in der letzten Zeit eingerichteten Forschungsnetzwerk „Energie in Gebäuden und Quartieren“ spielt im Netzwerk „Energie in Gebäuden und Quartieren“ eine prominente Rolle. Aus den Diskussionen in diesem Netzwerk möchten wir möglichst bald eine Förderbekanntmachung zum Thema „Solare Gebäude und Quartiere“ erarbeiten. Diese Thematik wollen wir in den nächsten Jahren angehen, um das Gebäude in den Gesamtkontext der Strom- und Energieversorgung zu setzen.

Im Rückblick über die letzten 35 Jahre hatte ich manchmal den Eindruck, dass Forschung und Entwicklung dem Sisyphos in der griechischen Mythologie gleicht, der einen Stein immer wieder einen Berg hinaufwälzt, der aber stets vor Erreichen des Gipfels wieder herunterrollt. Wissenschaftliche Forschung und technologische Entwicklung beschreiten keinen geradlinigen Weg, vielmehr ist die Entwicklung von Erfolgen und Rückschlägen begleitet. Zum Glück bleibt die technische Entwicklung aber nicht wie Sisyphos immer am gleichen Punkt stehen, sondern führt – wie die Erfahrung lehrt – zu einem stetig steigenden Kenntnisstand. Ich bin deshalb sehr optimistisch, dass es auch bei den neuen Energietechnologien gelingen wird, die Entwicklungen erfolgreich weiterzuführen.

Ich bin überzeugt, dass auch eine Veranstaltung wie die FVEE-Jahrestagung einen wichtigen Beitrag dazu leisten wird. Ich möchte Ihnen deshalb wünschen, dass Sie viele Erkenntnisse mit nach Hause nehmen können und auch erfolgreiche Netzwerke auf dieser Tagung bilden können.

Wir brauchen Ihr Engagement und die Erkenntnisse, die Sie aus Ihren Forschungen generieren, damit wir in Deutschland und in der ganzen Welt die ehrgeizigen Energie- und Klimaziele erreichen können.

Vielen Dank!

Grußwort des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit



BMUB
 BMUB – Bundesministerium für
 Umwelt, Naturschutz, Bau und
 Reaktorsicherheit
 MinDir Günther Hoffmann
 guenther.hoffmann@bmub.
 bund.de

Einleitung

Deutschland befindet sich auf dem Weg zum Ausstieg aus der Kernenergie. Wie wir alle wissen, ist eine zentrale Voraussetzung hierfür eine verlässliche, kontinuierliche Forschungsförderung bei erneuerbaren Energien in allen Bereichen. Ich möchte heute für den Baubereich des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit sprechen. Das Jahr 2015 stimmt mich in diesem Sinne sehr hoffnungsvoll! Dabei gilt mein besonderer Dank dem seit 25 Jahren verlässlichen Engagement des Forschungsverbands Erneuerbare Energien, der dazu entscheidende Beiträge geleistet hat!

Außerordentlich freue ich mich, dem jungen 25-jährigen Jubilar (Gründung 1990 in Frankfurt am Main in Folge des Reaktorunglücks in Tschernobyl) zu seinem stets trendsicheren Geist gratulieren zu können. Schon 1992 wies der Forschungsverbund in seinem ersten Memorandum auf folgende zwei Handlungsfelder als zentrale Herausforderungen hin:

- globale Umwelt- und Klimaverträglichkeit der Energietechniken und
- ausreichende Energieversorgung für eine wachsende Bevölkerung der Erde

als Voraussetzung für Wohlstand und Stabilität der Welt, in der wachsenden Bedürfnisse vor allem in weniger entwickelten Regionen befriedigt werden müssen, wenn nicht Völkerwanderungen unseren inneren und äußeren Frieden gefährden sollen...“. Heute, 23 Jahre später, sind diese Forderungen aktueller denn je. Und neben der weltlichen mahnt inzwischen auch erstmalig die kirchliche Macht in diesen Jahr mit der Veröffentlichung der „Umwelt Enzyklika“/„Laudato si“ von Papst Franziskus (18. Juni 2015) entsprechenden Handlungsbedarf und ein Umdenken bei diesem Thema an.

Gespannt blicken wir nach dem hoffnungsvollen Startschuss für eine „CO₂-neutrale Welt“ auf dem G7-Gipfel nun auf den anstehenden UN-Klimagipfel in Paris.

Hier werden erste konkrete Beiträge aller Beteiligten gefordert. Entsprechend erscheint die vom Forschungsverbund für seine Jubiläumsjahrestagung gewählte Überschrift „Forschung für die Wärmewende“ für den Baubereich passend gewählt. Zugleich verdeutlicht sie noch einmal mehr die

gemeinsamen Wurzeln des Forschungsverbundes und des Bundesumwelt- und Bauministeriums (Gründung 1986 in Folge des Reaktorunglücks in Tschernobyl). Unser gemeinsames Streben gilt der Förderung der Nachhaltigkeit im Baubereich durch Forschung und Entwicklung entsprechend folgendem Leitbild:

„Forschung und Entwicklung zeigen neue Perspektiven für eine nachhaltige, verlässliche Energieversorgung. Der Ausbau erneuerbarer Energien in allen Bereichen steht dabei an oberster Stelle.“

Klimaschutz

Die Bundesregierung hat sich im Koalitionsvertrag zur Energiewende und zum Klimaschutz bekannt und Effizienz gleichrangig als zweite Säule einer nachhaltigen Energiewende betont. Sie alle kennen die Ziele:

- Bis 2050 ist ein nahezu klimaneutraler Gebäudebestand zu erreichen.
- Bis 2050 wird die Minderung des Primärenergiebedarfs 80 % zu mindern sein.
- Bis 2020 soll der Wärmebedarf um 20 % reduziert werden.

In der Umsetzung heißt das für den Gebäudebereich, dass große Anstrengungen zur Verringerung des Wärmebedarfs notwendig sind. Dies ist aber auch zwingende Voraussetzung für bestimmte Anlagen-Technologien – vor allem zur Nutzung von erneuerbaren Energien und damit für eine nachhaltige Energieversorgung. Denken Sie zum Beispiel an Wärmepumpen oder solare Systeme: Erst gute Wärmedämmung und neue Fenster bieten die Möglichkeit, Heizungsanlagen mit so niedrigen Temperaturen zu fahren, dass die Potenziale dieser effizienten Systeme auch tatsächlich effektiv genutzt werden können. Gebäudehülle, Anlagentechnik und Nutzung erneuerbarer Energien sind also eng miteinander verknüpft. Wir stehen hier vor einer Herausforderung, der wir uns stellen müssen. Denn in Deutschland werden mehr als ein Drittel der Endenergie für die Beheizung von Gebäuden, die Warmwasserbereitung sowie für Beleuchtung eingesetzt. 15 % der direkten Treibhausgasemissionen entfallen auf den Gebäudebereich.

Aktionsprogramm Klimaschutz 2020/ NAPE

Deshalb hat die Bundesregierung am 3. Dezember 2014 mit dem „Aktionsprogramm Klimaschutz 2020“ und dem „Nationalen Aktionsplan Energieeffizienz“ (NAPE) entscheidende Maßnahmen beschlossen:

Mit dem „Aktionsprogramm Klimaschutz 2020“ wurden ehrgeizige Klimaziele für 2020 und darüber hinaus gesetzt. Wir haben verabredet, unsere Treibhausgasemissionen bis zum Jahr 2020 um mindestens 40 Prozent gegenüber 1990 zu senken. Wir sehen dies als Meilenstein auf dem Weg zu einer Minderung von mindestens 80 bis 95 Prozent bis 2050.

Das „Aktionsprogramm“ soll die Erreichung des Klimaschutzziels für 2020 und darüber hinaus bis 2050 sichern. Um die gesetzte Zielmarke von „minus 40%“ zu erreichen, hat die Bundesregierung eine ganze Reihe von Maßnahmen verabschiedet. 25 bis 30 Millionen Tonnen Treibhausgase sollen allein durch eine gesteigerte Energieeffizienz in Industrie, bei privaten Haushalten, aber vor allem auch im Gebäudebereich eingespart werden.

Gestatten Sie mir die Darstellung von drei zukunftsweisenden baupolitischen Aktivitäten meiner Bauabteilung zur Verfolgung dieser Klima- und Umweltziele. Sie stehen beispielhaft für neue Wege der Zusammenarbeit zwischen Forschung und Politik und folgen dem BMUB bewährten Instrumentenmix „Fordern, Fördern und Informieren“.

1. Fordern:

EnEV und EEWärmeG

Das Bundesumwelt- und Bauministerium hat mit den Ländern eine strukturelle Neukonzeption von Energieeinsparverordnung (EnEV) und Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz (EEWärmeG) in 2016 vereinbart.

Aktuell werden hierzu im Rahmen einer Bund-Länder-Arbeitsgemeinschaft z. B. für die Fortschreibung der EnEV technisch und wirtschaftlich machbare Mindestanforderungen im Einzelnen gutachterlich ermittelt. Erste Ergebnisse werden auf einer Sonderbauministerkonferenz gegen Mitte 2016 erwartet.

Gleichzeitig laufen Forschungsarbeiten zum Abgleich des Erneuerbare-Energien-Wärmegesetzes mit den Bestimmungen der EnEV. Geprüft werden Überschneidungen an Schnittstellen und Vereinfachungsmöglichkeiten. Es handelt sich dabei um eine ergebnisoffene Prüfung, die die bessere Integration erneuerbarer Energien in die Wärmeversorgung von Gebäuden zum Ziel hat.

Dabei möchte ich darauf hinweisen, dass die derzeitigen Herausforderungen bei der Schaffung von Flüchtlingsunterbringungen auch flexibles Handeln von allen Beteiligten fordern. Die Bundesregierung hat bereits ein umfangreiches Maßnahmenpaket zur Beseitigung möglicher Hürden beschlossen. So können zum Beispiel ausschließlich im Bereich der Aufnahmeeinrichtungen und Gemeinschaftsunterkünfte im Sinne des Asylgesetzes Einzelfallbefreiungen bzw. Erleichterungen von der EnEV erfolgen, ohne notwendiges geltendes Energiesparrecht zu gefährden.

2. Fördern:

CO₂-Gebäudesanierung

Mit Fortführung und Aufstockung des erfolgreichen CO₂-Gebäudesanierungsprogramms fördert die Bundesregierung weiterhin überaus erfolgreich notwendige Energieeffizienzmaßnahmen im Baubereich. In enger Zusammenarbeit zwischen Bundeswirtschaft- und Energieministerium und dem Bundesumwelt- und Bauministerium wird an der Verstetigung und dem Ausbau der Förderprogramme der Kreditanstalt für Wiederaufbau (KfW) gearbeitet. Diese Programme zum energieeffizienten Bauen und Sanieren haben sich als ein zentrales Zugpferd der Energiewende erwiesen.

Zukunft Bau

Ein mir besonders wichtiges Förderprogramm des Bundesumwelt- und Bauministeriums ist „Zukunft Bau“. Wie im Koalitionsvertrag festgeschrieben, fördert diese bauangewandte Initiative seit 10 Jahren gemeinsam mit Forschung und Wirtschaft die Weiterentwicklung im Bauwesen.

Effizienzhaus Plus

Eine herausragende Stellung innerhalb dieser Bauforschungsinitiative nehmen seit 2011 die Modellvorhaben Effizienzhäuser Plus ein. Diese durch das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit geförderten Prototypen der Häuser der Zukunft fördern gezielt den Forschungsdialog und informieren in einem öffentlichen Netzwerk beispielhaft über die aktuelle Baupolitik und die Anforderungen an das Bauen der Zukunft.

Mittels erneuerbarer Energien erzeugen Effizienzhäuser Plus über das Jahr betrachtet mehr Energie als sie selbst für den Betrieb des Hauses benötigen. Diese Vorhaben fördern erstmalig ausdrücklich auch die ästhetisch-gestalterische und baukulturell wertvolle Integration erneuerbarer Energien in die Gebäudehülle.

Alle geförderten Gebäude werden über zwei Jahre lang technisch und sozialwissenschaftlich begleitet. Inzwischen zeigen die über 35 bundesweit errichteten Effizienzhäuser Plus Wohngebäude eine neue klimaneutrale Gebäudegeneration. Planungs-, material- und technologieoffen (vom Massivhaus- bis zum Leichtbau, vom Einfamilien- bis zum Mehrfamilienhaus, vom Neubau bis zum Sanierungsobjekt) werden Effizienz und Wirtschaftlichkeit verschiedener Ansätze dieser neuen Gebäudegeneration im Praxistest auf den Prüfstand gestellt.

Auf Grund erster vorliegender, sehr erfreulicher Forschungsergebnisse dieser Vorhaben haben wir auch eine neue Förderrichtlinie für Bildungsbauten bekannt gegeben (19. Januar 2015). Ziel ist es, diese neue Gebäudegeneration auf den Nichtwohnungsbau auszuweiten. Am Ende sollen uns auch wissenschaftlich fundierte Erfahrungen dieser neuen Gebäudegeneration aufzeigen, wie nachhaltiges, klimaneutrales Bauen der Zukunft sich weiter entwickeln und wirtschaftlich vertretbar in den Markt eingeführt werden kann.

3. Informieren:

Bündnis für bezahlbares Wohnen und Bauen, Baukostensenkungskommission

Frau Bundesministerin Dr. Barbara Hendricks möchte neben energie- und Klimaschutzpolitischen Aspekten aber auch das Bewusstsein schärfen für die ausgewogene Berücksichtigung sozialer Aspekte. Das von ihr am 10. Juli 2014 ins Leben gerufenen Bündnis für bezahlbares Wohnen und Bauen mit seiner Baukostensenkungskommission und mehreren Arbeitsgruppen arbeitet derzeit an ersten Vorschlägen u. a. zu folgenden Handlungsfeldern, um sie in 2016 dem Kabinett vorzulegen:

- Stärkung der Investitionen in den Wohnungsbau
- Bereitstellung von Bauland
- Dämpfung der Baukostensteigerung
- Altersgerechter Umbau im Quartier
- Soziales und klimafreundliches Wohnen und Bauen

Schlusswort

Die Erfolgsgeschichte des heutigen „Mittzwanzigers“ FVEE zeigt, dass die besten Lösungen zur Umsetzung der Energie- und Klimaschutzziele durch gemeinsames, vertrauensvolles Zusammenarbeiten von Wissenschaft, Wirtschaft und Politik entstehen und die Basis für Innovationen, Weiterentwicklung und Wettbewerbsfähigkeit sind.

Auf unserem gemeinsamen nachhaltigen Entwicklungspfad wird das Bundesumwelt- und -bauministerium mit dafür sorgen, den Dreiklang „gleichzeitig Mieten und Heizkosten zu begrenzen und ausreichend Wohnraum zur Verfügung zu stellen“ zu fördern!

In diesem Sinne wünsche ich Ihnen allen auf der diesjährigen Jahrestagung viele neue nützliche Erkenntnisse und Ideen für Ihre künftige Arbeit sowie für die Zukunft alles Gute!

Grußwort des Bundesministeriums für Bildung und Forschung

Sehr verehrte Damen und Herren,

zunächst möchte ich dem Forschungsverbund Erneuerbare Energien herzlich zum 25. Jubiläum gratulieren und darf Ihnen auch die Glückwünsche der Bundesforschungsministerin zu diesem Jubiläum überbringen. Die Gründung dieses Verbunds war eine kluge und notwendige Entscheidung, um die Aktivitäten und Kapazitäten zu bündeln und sich stärker abzustimmen. Der FVEE ist ein wesentlicher Wegbereiter für das Zeitalter der erneuerbaren Energien und ein wertvoller Partner für Wissenschaft, Politik und Öffentlichkeit. Auch die Entscheidung, über den solaren Bereich hinauszugehen und sich den Erneuerbaren als Ganzem zuzuwenden, trägt zur Relevanz des FVEE bei.

Aufholjagd bei der Wärmewende

Die Wärmewende ist ein zentrales Handlungsfeld im Rahmen der Energiewende. Hier besteht Nachholbedarf. Daher haben Sie zu Recht dieses Thema in den Mittelpunkt Ihrer Jahrestagung 2015 gestellt. Sie haben unlängst hierzu ein eigenes Positionspapier vorgelegt. Für Ihre Anregungen gerade auch mit Blick auf künftige Forschungsbedarfe danke ich Ihnen herzlich.

Wenn wir die gesetzten Ziele erreichen wollen, müssen wir auch in der Forschung konzertiert vorgehen. Daher begrüße ich als Vertreter des Forschungsressorts, dass Sie auch im Rahmen dieser Tagung Anregungen zusammentragen, wie wir in der Forschung die Energiewende konzertiert angehen können. Diese Veranstaltung kommt zur rechten Zeit, vielleicht müssen wir sogar eine Aufhol-Strategie starten, um Verpasstes nachzuholen.

Im vergangenen Jahr deckten die erneuerbaren Energien schon rund ein Viertel der Stromnachfrage – aber erst grob 10 % des Wärmebedarfs. Die Hebelwirkung des Themas Wärme wird umso deutlicher, wenn man sich die Zahlen für den Endenergieverbrauch vor Augen führt: Lediglich gut 20 % des kompletten Energieverbrauchs in Deutschland entfallen auf die Elektrizität. Etwa die Hälfte des Endenergiebedarfs wird benötigt, um Gebäude zu beheizen und die Industrie mit der notwendigen Prozesswärme zu versorgen.

Es ist sehr erfreulich, dass Herr Ministerialdirektor Günther Hoffmann mitgeteilt hat, dass es vom Bundesumweltministerium Förderprogramme für die Wärmewende gibt.

Wir kennen aber auch Diskussionen bei Architekten und Stadtplanern, die Wärmeeffizienzmaßnahmen als bauphysikalisch problematisch ansehen. Bei der Effizienz im Städtebau haben wir Probleme, die wir technisch angehen müssen, die sich aber auch auf den Geldbeutel und auf die Wohnqualität auswirken. Hier gibt es also Forschungsbedarf.

Auch im Industriesektor gibt es Nachholbedarf. Hier fallen etwa 70 % des Energiebedarfs als Prozesswärme an. Man könnte vermuten, dass dieser große Kostenfaktor schon aus rein wirtschaftlicher Notwendigkeit bereits von der Industrie angegangen worden wäre; doch auch hier gibt es noch erhebliches Verbesserungspotenzial.

Deutschland braucht die Wärmewende, wenn die Energiewende geschafft werden soll. Energiepolitisches Ziel ist die Reduzierung des Wärmebedarfs um 20 % bis 2020. Das werden wir nur mit weiteren Anstrengungen in Forschung und Innovation schaffen.

Aus Sicht des BMBF möchte ich zwei zentrale Initiativen hervorheben: Die Zukunftsstadt und die Kopernikus-Projekte.

1. Zukunftsstadt

Die Wärmewende beginnt bei den Haushalten, wo das Heizen mit rund 70 % den Löwenanteil der Energie verschlingt. Gleichzeitig wird in Städten drei Viertel der Energie verbraucht. Die Nachhaltigkeit im System Stadt ist ein zentrales Thema für das BMBF.

Forschung wird nur dann ihre Wirkung entfalten, wenn von Beginn an die potentiellen Nutzer und Anwender wie etwa die Kommunen in die Ausgestaltung der Forschungsprogrammatik aber auch die Forschungsaktivitäten selbst einbezogen werden. Dieser Leitlinie folgend hat das BMBF eine Reihe von Initiativen gestartet, die dazu beitragen werden, die Herausforderungen in den Städten anzugehen. Zum Beispiel den Wettbewerb „Zukunftsstadt“: Das BMBF fördert in einer ersten von drei Förderphasen mit bis



BMBF
Bundesministerium für
Bildung und Forschung
MinDirig Wilfried Kraus
wilfried.kraus@bmbf.bund.de

zu 1,75 Millionen Euro in 52 ausgewählten Städten, Gemeinden und Landkreisen Bürgerdialoge zur zukünftigen Stadtentwicklung. Das BMBF setzt hierbei u. a. auf die Erforschung technologischer Lösungen, die vom Flammenschutz für nachhaltige Dämmmaterialien bis zur Entwicklung neuer Wärme- und Kältespeicher reichen.

Der Schwerpunkt kann aber nicht mehr nur auf den Einzeltechnologien liegen. Es geht darum, die Themen Energieerzeugung, Energieverteilung und Energiespeicherung noch viel enger miteinander zu verzahnen. Wir brauchen eine systemische Betrachtung.

Im interministeriellen Arbeitskreis zum Thema „Nachhaltige Stadt“, haben wir uns darauf verständigt, die Innovationsplattform Zukunftsstadt aufzubauen, um dort Themen wie Wärme, Wärmeerzeugung in der Stadt und im systemischen Verbund zu betrachten. Die Plattform hat zwischenzeitlich eine übergreifende strategische Innovations- und Forschungsagenda vorgelegt. Der Agenda-Prozess hat u. a. die Erkenntnis hervorgebracht, dass die sinnvollste Bezugsgröße das Quartier ist, nicht aber einzelne Häuser. Für Quartiere können Sie Wärmekonzepte, Stromkonzepte und Mobilitätskonzepte mit wesentlich größeren Hebelwirkungen und Effekten und geringeren Kosten für Hausbesitzer und -bewohner entwickeln, weil Sie Synergien für eine effiziente Versorgung nutzen können.

Die Innovationsplattform Zukunftsstadt zeigt die gute Zusammenarbeit der Ministerien. Das BMBF arbeitet hier schon mit dem Umweltministerium (BMUB) und dem Verkehrsministerium (BMVI) zusammen und zukünftig auch mit dem Wirtschaftsministerium (BMWi). Wir möchten die Hebelwirkung nutzen, um die Umsetzung der Erkenntnisse zu erreichen, die in der Grundlagenforschung gewonnen werden. Im Rahmen dieser Tätigkeit wird es Forschungsvorhaben geben.

Wir brauchen den ressortübergreifenden Schulterschluss.

Dies sage ich auch mit Blick auf die Zusammenarbeit von BMBF und BMWi im Kontext der geplanten Initiative „Solares Bauen“. Wir werden das Thema „Zukunftsstadt“ in den nächsten Monaten in die Förderung überführen.

Der Umbau der Städte wird auch im Staatssekretärsausschuss „Nachhaltige Stadtentwicklung“ in einer eigenen interministeriellen Arbeitsgruppe behandelt. Dies unterstreicht die Bedeutung und Relevanz. Dies ist zweifelsohne eine politische und gesellschaftliche Gestaltungsaufgabe ersten Ranges.

2. Kopernikus-Projekte

Im September 2015 hat Frau Ministerin Wanka das neue Förderformat der Kopernikus-Projekte für die Energiewende verkündet.

Das Ziel der Kopernikus-Projekte sind marktreife Lösungen und die breite Anwendung. Wir stellen heute die Weichen dafür, dass wir ab 2025 technologisch exzellente, wirtschaftlich wettbewerbsfähige und gleichzeitig aber auch gesellschaftsverträgliche Lösungen für die Energiewende anbieten können. Das BMBF wird für die nächsten drei Jahre bis zu 120 Millionen Euro für die Kopernikus-Projekte bereitstellen. Das Wirtschaftsministerium hat einen Einstieg zu einem späteren Zeitpunkt in Aussicht gestellt.

Bei den Kopernikus-Projekten geht es darum, systemisch an die Thematik heranzugehen, langfristig zu fördern, Kernfragen der Energiewende anzugehen und – ganz entscheidend – die notwendigen Stakeholder bis hin zur Zivilgesellschaft mit einzubeziehen. Vertreter aus Wissenschaft, Wirtschaft und Zivilgesellschaft haben gemeinsam Zukunftsthemen identifiziert, die die inhaltliche Grundlage der Kopernikus-Projekte bilden.

Bei Investitionen in Wärmedämmung oder auch in eine neue Heizungsanlage müssen Sie zunächst einmal den Bürger davon überzeugen, das nötige Geld dafür in die Hand zu nehmen, um die Technologien zu bezahlen. Nur so können Sie die politischen Zielsetzungen umsetzen.

Deshalb sind wir gut beraten, bei der Energiewende ebenso wie bei den Projekten zur Wärmewende immer auch an den Bürger oder den kommunalen Entscheider zu denken. Darum haben wir Agendaprozesse wie beim Forschungsforum Energiewende oder der Nationalen Plattform Zukunftsstadt gestartet. Dabei haben wir die Stakeholder, Verbraucher, wirtschaftliche und politische Entscheider sowie die Wissenschaft gefragt, welchen Themen wir uns mit welcher Priorität widmen sollten. Auf der anderen Seite verpflichten sich diejenigen, die an diesem Prozess teilnehmen, die entwickelten Innovationen genauer anzusehen und wir dürfen die Erwartung haben, dass sie sie dann auch anwenden. Es muss ein Commitment geben, das über die Programmdefinition hinausgeht. Die Projekte müssen kritisch begleitet werden und es müssen am Ende Innovationen und Lösungen für die Energiewende geschaffen werden.

Das Thema Wärme wird im Rahmen des Kopernikus-Themenfelds „Industrieprozesse“ eine Rolle spielen. Wir suchen Antworten auf die Frage, wie sich die Netze der Wärme- und Stromversorgung effizient und verlässlich verknüpfen lassen. Wie können Speichersysteme diese Netze entlasten? Wann macht es Sinn, Überschussstrom in Wärme umzuwandeln? Und vergessen Sie nicht den Energiebedarf unserer Industrie, wo rund zwei Drittel des Energieverbrauchs auf Prozesswärme entfallen. Lassen sich diese energieintensiven Industrieprozesse so einbinden, dass sie an die fluktuierende Energieversorgung der Erneuerbaren Energien angepasst sind – und diese sogar ausgleichen können? Sie sehen an diesen Beispielen, dass wir mit den Kopernikus-Projekten das Zusammenspiel der verschiedenen Sektoren des Energiesystems betrachten. So sollen Konzepte entwickelt werden, mit denen die übergeordneten Ziele Versorgungssicherheit, Wirtschaftlichkeit und Klimaverträglichkeit erreicht werden können.

Forschung braucht Vorlauf

Es sind noch große Forschungsleistungen notwendig, um die für 2050 gesteckten Ziele zu erreichen. Was aber im Jahr 2050 auf dem Markt sein soll, muss bis spätestens 2025 erfunden sein. Die Politik denkt meist in den Zeiträumen einer Legislaturperiode. Dass sich innerhalb von drei bis vier Jahren Innovationen vollziehen, ist aber nur ein frommer Wunsch. Ich habe am DLR den Bereich des Technologiemarketings mit aufgebaut und fünf Jahre lang geleitet. Realistisch für Innovationen ist: Wenn sie sehr gut sind, schaffen Sie es in acht Jahren, wenn sie durchschnittlich gut sind, schaffen Sie es in 15 Jahren. Im Energiebereich, haben Sie es mit Investitionszyklen von 30 Jahren zu tun. Für die Innovationen, die bis 2050 umgesetzt werden sollen, müssten die Forschungsergebnisse also bis 2020 am Start stehen. Wir brauchen also jetzt verstärkte Forschungsanstrengungen.

Das BMBF hat gemeinsam mit dem BMWi ein Statusseminar zu Energiespeichern veranstaltet. Dabei nahmen wir an, dass eigentlich schon alle Elemente für die Energiespeicherung vorhanden seien. Aber es zeigte sich, dass es noch Forschungsbedarf bei absoluter Grundlagentechnik, bis hin zur Materialforschung gibt. Zum Beispiel bei der Elektrolyse, die im Power-to-Gas-Verfahren benötigt wird: Im Klassenzimmer beherrscht sie jeder, doch wenn Sie Elektrolyse industriell in großem Maßstab zu vertretbaren Kosten durchführen wollen, stoßen sie auf große grundlegende Probleme.

Konzertierte Aktion für die Wärmewende

Wir sind uns wohl alle einig, dass die Forschung für die Wärmewende sehr wichtig ist. Für das BMBF kann ich sagen, dass wir gern bereit sind, mit allen Ressorts, vor allem mit dem BMWi und dem BMUB eine gemeinsame Förderinitiative für die Wärmewende zu starten.

Diese interministerielle Zusammenarbeit hat sich bereits bestens bewährt. Bei der Energiespeicherung sind BMBF, BMUB und BMWi gemeinsam zu der Einsicht gelangt, dass es nicht sinnvoll wäre, wenn alle Häuser getrennt ihre eigenen Förderprogramme aufstellen würden. Wir haben gemeinsam einen Workshop veranstaltet, darauf aufbauend eine einheitliche Ausschreibung bei einem Projektträger entwickelt und ein einheitliches Bewilligungs- und Evaluierungsverfahren beschlossen. Es gab eine große Zahl von Projektvorschlägen, die wir haben auswerten lassen. Dabei gab es keinen einzigen Dissens zwischen den Ressorts bezüglich der Bewertung der Projekte und der Zuordnung ihrer Finanzierung durch die Ressorts.

Dieses Angebot mache ich Ihnen meine Damen und Herren und den Kolleginnen und Kollegen aus den Ressorts:

Wir können eine konzertierte Aktion der Ministerien für die Wärmewende wiederholen. Damit gewinnen wir Zeit, die wir bis zur Umsetzung der Forschungsergebnisse brauchen. Sichern Sie die Ergebnisse dieser Konferenz, damit wir sie in den weiteren Prozess aufnehmen können. Wir können zu diesem Thema – auch mit Ihrer Unterstützung – einen kleineren Agendaprozess oder einen Workshop veranstalten, damit die Ministerien die Themen prioritär definieren können. Dann sind wir in der Lage, konzertiert gemeinsam mit Ihnen bei der Forschung für die Wärmewende ein gutes Stück vorwärts zu kommen.

In diesem Sinne wünsche ich dieser Konferenz viele gute Ideen, spannende Diskussionen und eine Vielzahl guter Vorschläge, wie wir die Wärmewende vorantreiben können.

Die Rolle der Wärme im Energiesystem: Systemaspekte



Wuppertal Institut
Prof. Dr. Manfred Fishedick
manfred.fishedick@wupperinst.org
Dietmar Schüwer
dietmar.schuewer@wupperinst.org

IZES
Prof. Dr. Uwe Leprich
leprich@izes.de

Fraunhofer IWES
Norman Gerhardt
norman.gerhardt@iwes.fraunhofer.de

Fraunhofer IBP
Patrick Schumacher
patrick.schumacher@ibp.fraunhofer.de

Fraunhofer ISE
Prof. Dr. Hans Martin Henning
hans-martin.henning@ise.fraunhofer.de

Gerhard Stryi-Hipp
gerhard.stryi-hipp@ise.fraunhofer.de

ZSW
Maike Schmidt
maike.schmidt@zsw-bw.de

Entwicklung und aktuelle Bedeutung der Wärmebereitstellung aus erneuerbaren Energien

Der zentrale Treiber des Endenergiebedarfs in Deutschland ist die Wärmenachfrage in Form von Raumwärme (29,2 %), Warmwasser (5,5 %) und Prozesswärme (21,1 %). Mit insgesamt 5.179 PJ (1.439 TWh) ist Wärme verantwortlich für rund 56 % des gesamten Endenergiebedarfs von 9.268 PJ im Jahr 2013¹. Hinzu kommt eine weitere Nachfrage von 2,1% für Klimakälte (0,4 %) und sonstige Prozesskälte (1,7%). In der Endenergiebilanz für Deutschland verringerte sich in den Jahren von 1990 bis 2012 der Brennstoffverbrauch für die Wärmebereitstellung um 13 %. Im Vergleich zum Kraftstoffverbrauch beispielsweise, welcher sich im gleichen Zeitraum sogar geringfügig erhöhte (+ 3 %), fällt die Bilanz im Wärmebereich deutlich positiver aus, gleichwohl bleibt der größte Teil des bestehenden Effizienzpotenzials bis dato nicht ausgeschöpft.

Beim Ausbau der erneuerbaren Energien im Wärmesektor fallen die Erfolge der letzten Jahre – insbesondere im Vergleich zum Stromsektor – bescheiden aus. Zwischen 2007 und 2014 stieg der Anteil erneuerbarer Wärme lediglich von 7,6 % auf 9,9 %, der Anteil erneuerbaren Stroms jedoch von 14,2 % auf 27,8 %. Seit 2012 stagniert der Anteil erneuerbarer Wärme bei knapp 10 %².

Wie **Abbildung 1** zeigt, dominiert innerhalb der Wärmebereitstellung aus erneuerbaren Energien mit einem Anteil von fast 87 % (113 Mrd. kWh in 2014) nach wie vor der Einsatz von Biomasse (inkl. biogener Anteile des Abfalls), darunter insbesondere die Verbrennung von traditionellen biogenen Festbrennstoffen wie Holz. Der Rückgang bei fester Biomasse im Jahr 2014 ist insbesondere auf den milden Winter zurückzuführen. Er überkompensiert den geringen Ausbau der „neuen“ erneuerbaren Energietechnologien Solarthermie (5,3 % bzw. 6,9 Mrd. kWh) und Geothermie und Umweltwärme (zusammen 8,1 % bzw. 10,6 Mrd. kWh). Diese Technologien liegen zwar noch auf niedrigem Niveau, haben aber die größten Zubaupotenziale, wohingegen

die Biomassepotenziale unter Berücksichtigung von Nachhaltigkeitskriterien und Nutzungskonkurrenzen begrenzt sind.

Insgesamt hat die Entwicklung der erneuerbaren Energien im Wärmesektor im Vergleich zum Stromsektor noch großen Nachholbedarf im Energiesystem. Dies zeigt auch die sektorale Bilanz der durch erneuerbare Energien vermiedenen Treibhausgas-Emissionen (**Abbildung 2**). Auch hier klappt die Entwicklung der Beiträge zur Emissionsreduzierung immer weiter auseinander. Perspektivisch muss sich das deutlich ändern, sollen die Klimaschutzziele der Bundesregierung erreicht werden. Die Analyse von Klimaschutzzenscenarien zeigt, dass zwischen 2008 und 2030 der Wärmesektor für Raumwärme und Warmwasserbedarf mit minus 62 % einen ähnlich großen CO₂-Reduktionsbeitrag leisten kann bzw. muss wie der Stromsektor (minus 57%). Diese Reduktionspotenziale liegen aufgrund begrenzter kurz- bis mittelfristig erschließbarer Potenziale deutlich über denen der Sektoren Verkehr (minus 22 %) und Industrie (minus 10 %). Daraus wird deutlich, dass es eine erfolgreiche Energiewende nur mit erfolgreicher Wärmewende geben kann (Matthes et al. 2013).

Die Klimaschutzziele der Bundesregierung für das Jahr 2050 sehen u. a. eine Reduktion der CO₂-Emissionen um 80 bis 95 % gegenüber 1990 vor. Wie die Matrix in **Abbildung 3** zeigt, führen zahlreiche Wege zum gewünschten Ziel mit Hilfe der beiden Stellschrauben „Reduktion des Endenergiebedarfs“ (Spalte 1 und 2) und „Reduktion der spezifischen CO₂-Emissionen pro Kilowattstunde Wärmebereitstellung“ (Zeile 1 und 2).

Die Reduktion des Endenergiebedarfs kann durch eine energieeffiziente Gebäudehülle oder durch Solararchitektur erzielt werden, die Reduktion der spezifischen CO₂-Emissionen durch effiziente Heizungsanlagentechnik (Brennwerttechnik, Kraft-Wärme-Kopplung, Wärmepumpen, Wärmerückgewinnung ...) und insbesondere durch den Einsatz erneuerbarer Energien.

Die Beispiele A und B in **Abbildung 3** zeigen, dass eine Reduktion des Endenergiebedarfs um 30 % bei gleichzeitiger Reduktion der spezifischen CO₂-Emissionen um 49 % (A) zum ähnlichen Ergebnis führt wie eine Energiebedarfsreduktion um 50 % und CO₂-Minderung bei der Anlagentechnik um 35 % (B).

1 Quelle: BMWi Energiedaten Gesamtausgabe, Stand: Mai 2015 (www.bmwi.de)

2 Quelle: BMWi, Stand: August 2015 (www.erneuerbare-energien.de)

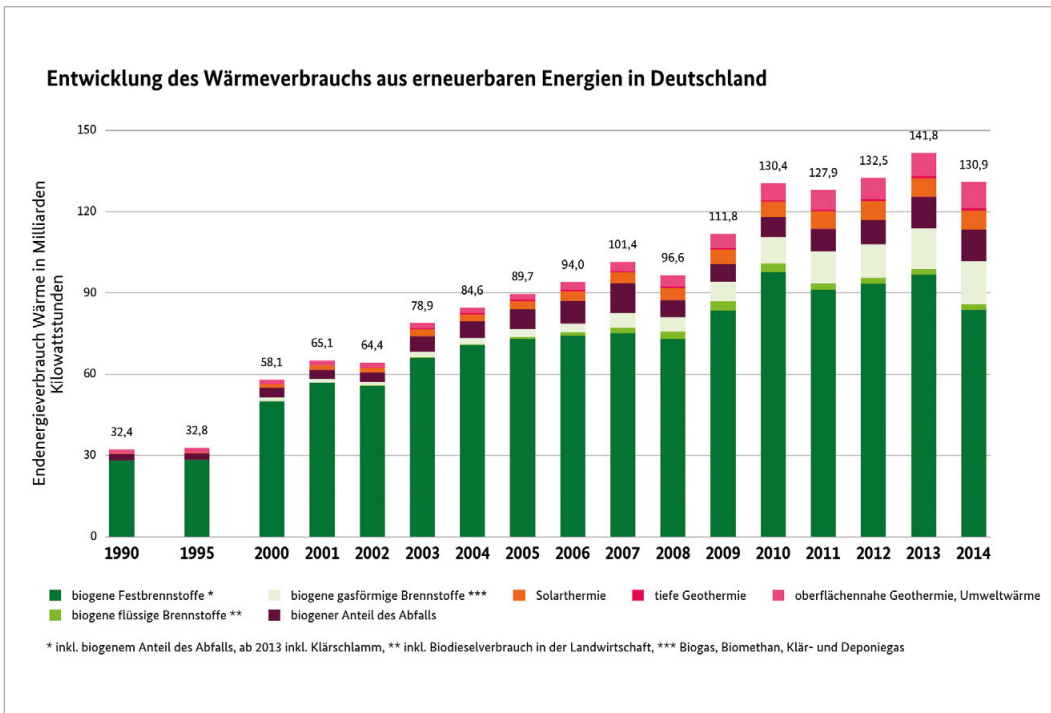


Abbildung 1
Anteil erneuerbarer Wärme: Entwicklung des Wärmeverbrauchs aus erneuerbaren Energien
 Quelle 1: BMWi auf Basis AGE-Stat, Stand Februar 2015, S. 21

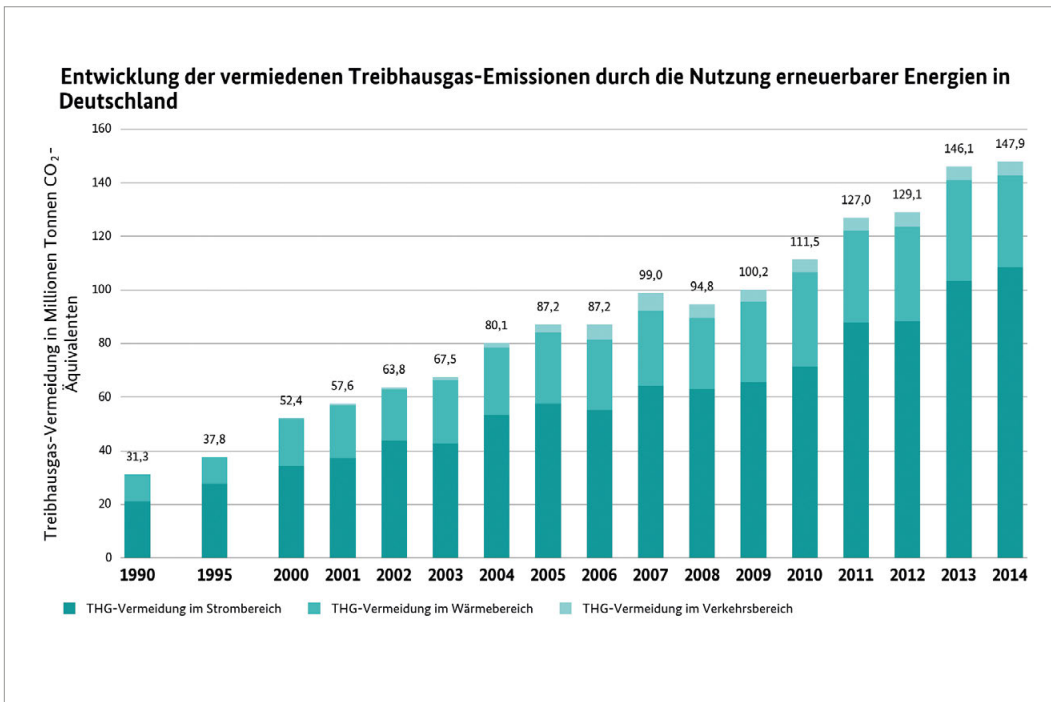


Abbildung 2:
Treibhausgas-Emissionen: Entwicklung vermiedener Treibhausgas-Emissionen durch Nutzung erneuerbarer Energien in Deutschland
 Quelle 1: BMWi auf Basis AGE-Stat unter Verwendung von Daten des UBA, Stand Februar 2015, S. 31

Abbildung 3
Erreichen von CO₂-Minderungszielen im Gebäudebereich:
 Wechselwirkung zwischen baulichem Wärmeschutz (Endenergiebedarf) und Anlagentechnik bzw. Anteilen erneuerbarer Energien (spez. CO₂-Emissionen)
 Quelle 2: Henning 2015

Endenergie RW	Endenergie RW + WW	spezifische CO ₂ -Emissionen für Raumwärme (RW) und Warmwasser (WW) in % bezogen auf den Wert heute									
		100%	93%	86%	79%	72%	65%	58%	51%	43%	36%
EE _{RW}	EE _{RW+EE_{WW}}	100%	93%	86%	79%	72%	65%	58%	51%	43%	36%
% (heute)	% (heute)	CO ₂ -Emissionen für Raumwärme und Warmwasser in % bezogen auf den Wert heute									
100%	100%	100%	93%	86%	79%	72%	65%	58%	51%	43%	36%
90%	91%	91%	85%	78%	72%	65%	59%	53%	46%	40%	33%
80%	82%	82%	77%	71%	65%	59%	53%	47%	42%	36%	30%
A 70%	74%	74%	68%	63%	58%	53%	48%	42%	37%	32%	27%
60%	65%	65%	60%	56%	51%	46%	42%	37%	33%	28%	24%
B 50%	56%	56%	52%	48%	44%	40%	36%	32%	28%	24%	20%
40%	47%	47%	44%	40%	37%	34%	30%	27%	24%	21%	17%
30%	38%	38%	36%	33%	30%	28%	25%	22%	19%	17%	14%

Wechselwirkungen
 Stromwende <> Wärmewende und
 Bedeutung von Systemlösungen

- Flexibilisierung durch Steuerung der Erzeugung (z. B. KWK-Regelenergie) oder Lasten (z. B. Wärmepumpen)

Wie *Abbildung 4* veranschaulicht, ist der Transformationsprozess hin zu einer dekarbonisierten Energiewelt gekennzeichnet durch eine zunehmende Wechselwirkung zwischen den Sektoren Strom, Wärme, Gas und Mobilität.

Die Vielfalt an neuen technologischen Optionen führt auch zu einer Diversifizierung der netzgebundenen Wärmeversorgung inklusive dem direkten und indirekten Einsatz von Strom (vgl. *Abbildung 5*).

Wichtige Schnittstellen zwischen dem Wärme- und Stromsystem sind:

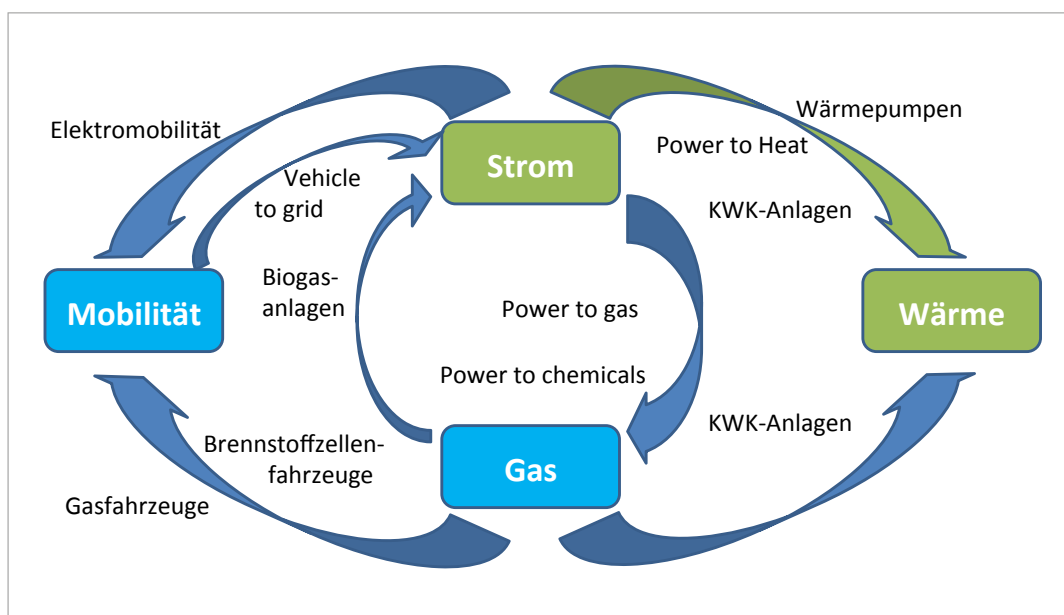
- Kraft-Wärme-Kopplung (KWK)
- elektrische Wärmebereitstellung / Power to Heat (Elektro-Wärmepumpen, Widerstandsheizung, elektrische Anwendungen für industrielle Prozesswärme)

Die zunehmenden Wechselwirkungen im Energiesystem erhöhen den Komplexitätsgrad des Transformationsprozesses und erfordern ein hohes Maß an Kooperation und interdisziplinärer Kompetenz.

Wichtige Aufgaben sind jetzt:

- Wechselwirkungen identifizieren
- Synergieeffekte ausschöpfen
- ggf. Zielkonflikte beachten

Abbildung 4
Wechselwirkungen
 zwischen den Sektoren Strom, Wärme, Gas und Mobilität
 Quelle: Wuppertal Institut



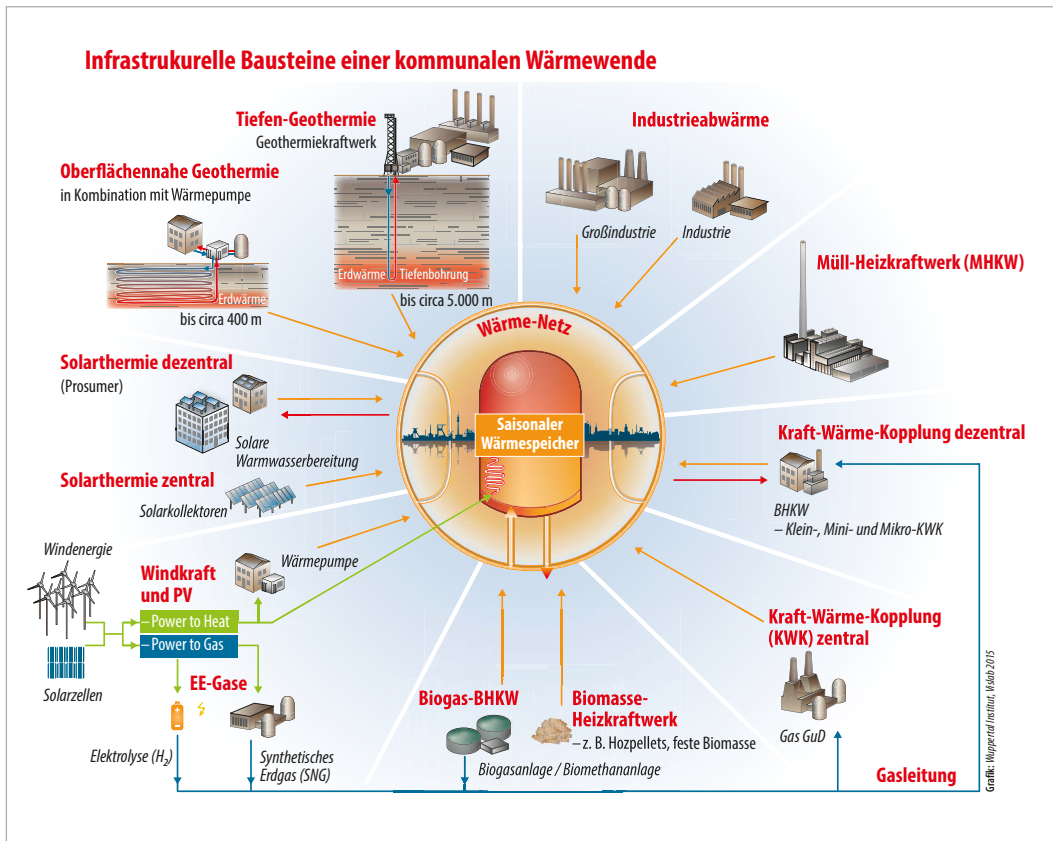


Abbildung 5
Kommunalen Wärmewende: infrastrukturelle Bausteine
 Quelle: Wuppertal Institut

Insgesamt müssen die bisher eher auf Einzelfälle ausgerichteten Maßnahmen im Wärmesektor zukünftig verstärkt Dynamiken und Synergien innerhalb von größeren Strukturen wie Städten, Quartieren und Infrastrukturen integrativ betrachten.

Beispiele einer solchen systemischen Herangehensweise können sein:

- Energetische Sanierung von Quartieren anstelle von Einzelgebäuden, um das Spannungsfeld Dämmung vs. Heizungserneuerung durch intelligente Systemlösungen aufzulösen, Skaleneffekte erschließen zu können und den Zugang zu weiteren technischen Lösungen zu ermöglichen
- Einbindung saisonaler Wärme-/Kältespeicher für Abwärme, Solar- und KWK-Wärme sowie Umgebungskälte
- Entwicklung von „Low-Ex-Konzepten“ im Wechselspiel zwischen Versorgung und Nachfrage (inklusive Ertüchtigung von Fernwärmenetzen bzw. Etablierung von entsprechenden Nahwärmenetzen)
- Entwicklung bzw. verbindliche Einführung flächendeckender und einheitlich strukturierter kommunaler Wärmenutzungspläne bzw. Energiekonzepte (raumbezogene „Masterpläne Wärmeversorgung“)

Ein konkretes Beispiel für den Ansatz der integrativen und systemischen Infrastrukturoptimierung ist die Einspeisung kostengünstiger solarthermischer Wärme aus Freiflächenanlagen in bestehende KWK-Nah- und Fernwärmenetze nach dänischem Vorbild (Sperber und Viebahn 2014). Eine Zukunftsaufgabe besteht darin, die Flexibilisierungspotenziale des Wärmemarktes (KWK-Anlagen, Wärmepumpen und Elektroheizer in Verbindung mit Speichern) zu entwickeln und technisch und betriebswirtschaftlich optimierte, strommarktgekoppelte Wärmesysteme zu etablieren. Dieser Ansatz verbindet die Wärme- und Stromsysteme miteinander und verbessert die Integration fluktuierend einspeisender erneuerbarer Stromquellen in das Energiesystem.

Das Beispiel Dänemark kann als etabliertes großmaßstäbliches Realexperiment angesehen werden. Zur Übertragung auf die deutsche Situation sollten hierauf aufbauend regionale Realexperimente entwickelt, begleitet und ausgewertet werden.

Daneben muss eine substantielle Marktausweitung solarer, geothermischer und Umgebungswärme auch im Prozesswärmemarkt erfolgen. Dafür ist ebenfalls eine Instrumentenausweitung und integrative Planung zum Beispiel gewerblicher Versorgungskonzepte unumgänglich.

Fazit

Um die kurz-, mittel- und langfristigen Herausforderungen bei der Transformation zu meistern und die Chancen im Wärmesektor zu nutzen, bedarf es innovativer Ansätze. Nachfolgend werden Schlussfolgerungen getroffen und Lösungsansätze skizziert:

- Eine erfolgreiche Energiewende ist nur mit einer Wärmewende erreichbar.
- Hauptthemnis für den Umbau hin zu einer klimaverträglichen Wärmeversorgung war bisher nicht etwa mangelnde Verfügbarkeit technischer Lösungen, sondern fehlender Umsetzungswillen bzw. mangelhafte Implementierung.
- Infrastrukturelle und intersektorale Zusammenhänge werden komplexer und müssen in ihrer Gesamtwirkung bedacht werden.
- Das „Aktionsprogramm Klimaschutz 2020“ und die „Energiewende Plattform Gebäude“ der Bundesregierung sind erste wichtige Schritte. Aber für eine erfolgreiche Wärmewende sind die bisherigen politischen Instrumente noch nicht ausreichend.
- Ein wichtiger Treiber für Investitionen in erneuerbare Wärme sind hohe Öl- und Gaspreise. Mit dem tendenziell sinkenden Preisniveau dieser fossilen Brennstoffe ging in den letzten Jahren ein Anreiz für mögliche Investoren verloren. Wie das Beispiel Dänemark zeigt, könnten CO₂-abhängige Steuern auf fossile Brennstoffe (ggf. gekoppelt an die Entwicklung der Brennstoffpreise) ein langfristiges Signal und Anreiz zum Umstieg auf erneuerbare Wärme setzen.
- Langfristig angelegte Sanierungsstrategien im Gebäudebereich sind unerlässlich. Hier können verbindlich zu erstellende individuelle Sanierungsfahrpläne und die Einführung eines Klimaschutz-Obolus für unsanierte Gebäude Transparenz und – unabhängig von Bundeshaushalt – Planungssicherheit für Gebäudeeigentümer herstellen.
- Die Energiepolitik muss verstärkt auf den Wärmesektor fokussieren bei gleichzeitig ganzheitlicher Betrachtung von Gebäudeeffizienz, Anlagentechnik, Sektorkopplung und sozialen Aspekten. Mögliche Maßnahmen sind:
 - Einführung dynamischer EEG-Umlagen als Anreiz für Nachfrageflexibilität
 - Verlagerung der KWK-Einspeisevergütung in die Wintermonate, um damit ein Fenster für die Einspeisung solarer (Fern-)Wärme in den Sommer- und Übergangsmonaten zu öffnen
 - Weiterentwicklung des Marktanzreizprogramms (z. B. haushaltsunabhängige verlässliche Förderung)
 - Ertragsorientierte Förderung der Einbindung von erneuerbaren Energien in die Fernwärme
 - Kopplung (Zusammenführung) von EnEV und EnWG zu einem konsistenten und transparenten Instrument

- Die Umsetzung der Wärmewende in Deutschland ist auch ein wichtiger Impuls für die Umsetzung ambitionierter Klimaschutzpfade auf europäischer und globaler Ebene.
- Eine wirkliche Energiewende erfordert die Notwendigkeit, Rebound-Effekte in den Griff zu bekommen. Energiebewusstes Verhalten muss gefördert werden, damit Effizienzeinsparungen nicht durch Mehrverbrauch (z. B. durch zunehmende Komfortansprüche) zunichte gemacht werden.
- Die Erfahrung zeigt, dass Effizienzpotenziale heute häufig durch falsche Bedienung und nicht sachgerechten Einbau unausgeschöpft bleiben. Daher bedarf es der Entwicklung adäquater Produkt-Service-Systeme, die eine effektive Ausschöpfung der Effizienzpotenziale neuer Produkte (z. B. Heizungstechnologien) möglich machen, durch frühzeitige Einbindung der Nutzer in die Produktentwicklung (z. B. im Rahmen von auf Co-Creation und Co-Development ausgerichteten Living Laboratories).

Quellenverzeichnis

1. BMWi (2015): Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland im Jahr 2014, Grafiken und Diagramme unter Verwendung aktueller Daten der Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik (AGEE-Stat). Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi), Berlin. www.erneuerbare-energien.de/EE/Navigation/DE/Service/Erneuerbare_Energien_in_Zahlen.html. Last access: 10 November 2015.
2. Henning, H.-M. (2015): Anlagentechnik im Gebäudebereich – neue Entwicklungen und ihre Umsetzung. Gehalten auf der Kongress der Energieagentur Rheinland-Pfalz am 16. Juli 2015, Mainz. www.energieagentur.rlp.de/veranstaltungen/jahreskongress/vortraege. Last access: 08 Dezember 2015.
3. Matthes, F. C.; Hansen, P.; Horn, M.; Dieckmann, J.; Eichhammer, W.; Ziesing, H.-J. (2013): Politik-szenarien für den Klimaschutz VI – Treibhausgas-Emissionsszenarien bis zum Jahr 2030. Climate Change. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt. <http://www.uba.de/uba-info-medien/4412.html>
4. Sperber, E.; Viebahn, P. (2014): Techno-ökonomische Perspektive – Systeminnovationen am Beispiel des Strom-Wärme-Systems. FVEE-Jahrestagung 2013, Freiburg. <http://elib.dlr.de/85028>. Last access: 27 Februar 2014.

Die Rolle der Wärme im Energiesystem: Wärmespeicher als Schlüsselkomponente isentropen Energiespeicher

Die ortsunabhängige und gleichzeitig preiswerte Speicherung elektrischer Energie in der Größenordnung des Tagesverbrauches einer Großstadt (Gigawattstunden, GWh) ist ein weitgehend ungelöstes Problem der Energietechnik. Dessen Lösung ist jedoch der Schlüssel für die Integration regenerativer Energiequellen in den Energiemix der Bundesrepublik Deutschland und der ganzen Welt.

Das Energiespeicherproblem in GWh-Maßstab ist zwar prinzipiell durch Pumpspeicherwerke und Batteriespeicher lösbar, doch ist das Potenzial für Pumpspeicherwerke in Deutschland erschöpft und Batteriespeicher sind für diesen Zweck gegenwärtig zu teuer und zu wenig zyklensfest.

Isentrope Energiespeicher besitzen das Potenzial, die Nachteile hoher Kosten und geringer Zyklensfestigkeit zu überwinden und überdies an beliebigen Orten der Welt installierbar zu sein. Im vorliegenden Beitrag wird das Grundkonzept der isentropen Energiespeicherung erläutert, an drei Beispielen illustriert und die zentrale Rolle der Wärmespeicher dargestellt.

modynamisches System, bei dem elektrischer Strom reversibel in Wärme sowie gegebenenfalls in weitere Energieformen umgewandelt wird und dessen maximaler theoretischer Wirkungsgrad deshalb 100 % beträgt.

Das einfachste Beispiel eines isentropen Energiespeichers ist ein Pumpspeicherwerk. Hier wird elektrische Energie im Idealfall reversibel in potenzielle Energie von Wasser umgewandelt. Dabei handelt es sich allerdings um einen trivialen isentropen Energiespeicher, weil die Umwandlung elektrischer Energie in potenzielle Energie ein rein mechanischer Prozess ist. Reibungsfreie mechanische Systeme sind aber stets isentrop und somit vom thermodynamischen Standpunkt aus betrachtet trivial.

Auch ein Schwungradspeicher ist ein isentropen Energiespeicher. Hier wird elektrische Energie im Idealfall reversibel in kinetische Energie einer rotierenden Masse verwandelt. Auch hier handelt es sich um einen trivialen isentropen Energiespeicher, weil die Umwandlung elektrischer Energie in kinetische Energie ebenfalls ein rein mechanischer und im reibungsfreien Fall isentropen Prozess ist.



DLR
Prof. Dr. André Thess
Andre.Thess@dlr.de

Was ist ein isentropen Energiespeicher?

Das Wort „isentrop“ steht für Vorgänge, die sich bei konstanter Entropie abspielen und deshalb umkehrbar sind. Ein isentropen Energiespeicher ist ein ther-

Abbildung 1 zeigt das einfachste nichttriviale Beispiel eines isentropen Energiespeichers – einen Strom-Wärme-Strom (SWS) Energiespeicher. Hier wird elektrische Energie in Wärme verwandelt und die

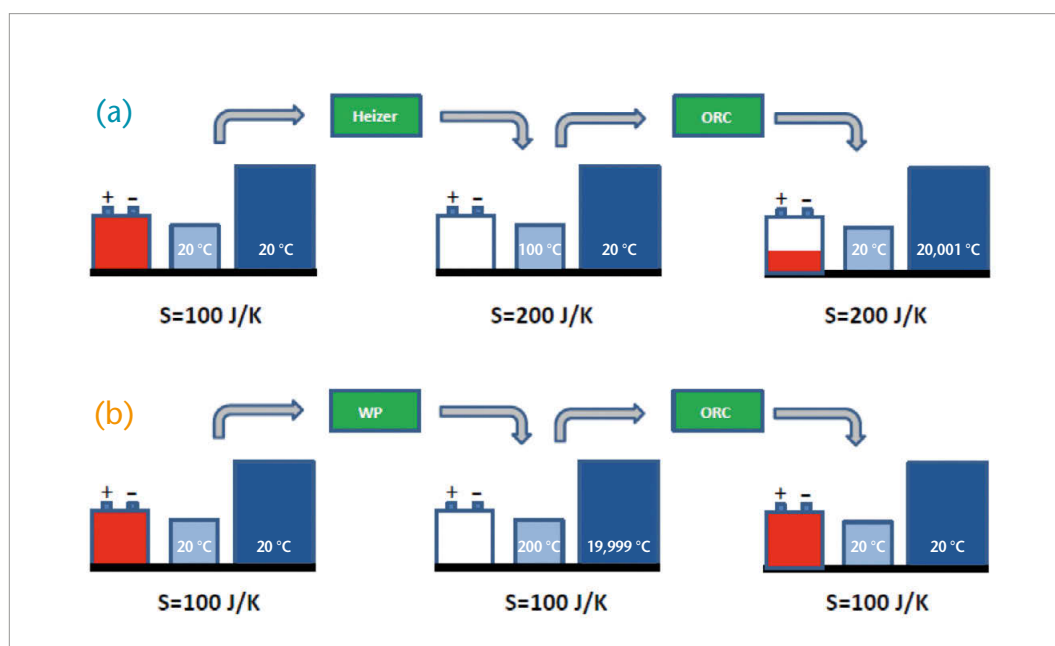


Abbildung 1
Strom-Wärme-Strom (SWS) Energiespeicher:
rot = Stromquelle zur Erwärmung des Wärmespeichermediums
hellblau = Wärmespeicher
dunkelblau = Umgebungswärme
(a) Nicht-isentroper SWS-Energiespeicher: Hier erhöht sich die Entropie S des aus dem Wärmespeicher und der Umgebung bestehenden thermodynamischen Systems bei Erwärmung.
(b) Isentroper SWS-Speicher bestehend aus einer Wärmepumpe (WP) und einer Wärmekraftmaschine (ORC = Organic Rankine Cycle): hier ist im Idealfall die Entropie S konstant.
(Die Entropiewerte sind willkürlich gewählt und dienen nur der Illustration.)

Wärme anschließend rückverstromt. Bei dem in *Abbildung 1a* gezeigten Beispiel handelt es sich um einen SWS-Speicher, der noch nicht isentrop ist. Zwar kann elektrischer Strom vollständig in Wärme verwandelt werden, wie etwa die Erwärmung eines Speicherbehälters von 20 °C auf 100 °C im Bild zeigt. Doch kann bei der Rückverstromung – zum Beispiel mittels einer Organic-Rankine-Cycle (ORC) Anlage – nur ein kleiner Teil dieser Energie in Elektrizität zurückverwandelt werden. Die Rückverwandlung der Wärme in Strom ist nämlich durch den Carnotschen Wirkungsgrad $\eta = (T_H - T_C) / T_C$ begrenzt. Hierbei bedeutet T_H die Speichertemperatur und T_C die Temperatur der Umgebung. Würde man beispielsweise Wasser mit Strom von 20 °C auf 100 °C aufheizen und die Wärme anschließend mit einer Carnot-Maschine verstromen, so ergäbe sich ein idealer Speicherwirkungsgrad von $80/293 \approx 27\%$. Davon ist in der Praxis bestenfalls die Hälfte, also etwa 14%, technisch machbar. Lässt sich dieses Carnot-Dilemma umgehen?

Abbildung 1b zeigt einen isentropen SWS-Energiespeicher. Wandelt man die elektrische Energie W nicht mittels elektrischer Heizung, sondern mittels einer Carnotschen Wärmepumpe mit dem Leistungsfaktor $\beta = (T_H - T_H) / T_C$ in Wärme um, so lässt sich eine größere Wärmemenge, nämlich $Q = \beta W = T_H / (T_H - T_C)$, in den Wärmespeicher einspeisen. Wird diese gespeicherte Wärme bei Bedarf mittels einer Carnotschen Wärmekraftmaschine wieder in Arbeit W' zurückverwandelt, so ergibt sich für die wiedergewinnbare Energie $W' = \eta Q = \beta \eta W$ wobei η der oben definierte Carnotsche Wirkungsgrad ist. Da das Produkt aus Carnotschem Leistungsfaktor β und Carnotschem Wirkungsgrad η gleich eins ist, folgt daraus $W' = W$! Das heißt, dass ein durch Kombination aus Carnotscher Wärmepumpe und Carnotschem Wärmekraftprozess bestehender SWS-Speicher einen isentropen Energiespeicher verkörpert.

Diese einfache thermodynamische Überlegung zeigt im Übrigen auch, dass die landläufige Aussage, der zufolge elektrische Energie „die Energieform mit dem höchsten Wert“ sei, nicht korrekt ist.

Systematik isentroper Energiespeicher

Es gibt insgesamt drei generische isentrope Energiespeicherkonzepte:

- I. Strom-Wärme-Strom-Energiespeicher (SWS)
- II. Adiabatischer Druckluftspeicher (ADS)
- III. Reversibler Brennstoffzellenspeicher (RBZ)

Abbildung 2 zeigt die Konzepte von einem vereinheitlichten thermodynamischen Standpunkt aus gesehen.

Jeder der drei Speicher (SWS, ADS und RBZ) besteht aus einem Beladesystem, einem Speichersystem und einem Entladesystem.

Je nach Art dieser Systeme kann das Gesamtspeichersystem entweder nicht-isentrop sein (idealer Wirkungsgrad kleiner als 100 %, *Abbildungen 2a, 2c, 2e*) oder isentrop (idealer Wirkungsgrad gleich 100 %, *Abbildungen 2b, 2d, 2e*):

I. SWS

(2a) Ein Strom-Wärme-Strom (SWS) Energiespeicher mit elektrischer Erwärmung des Wärmespeichermediums ist kein isentroper Energiespeicher, weil die Umwandlung von Strom in Wärme durch „einfaches“ elektrisches Heizen irreversibel (nicht umkehrbar) ist.

(2b) Ersetzt man den Elektroheizer durch eine Wärmepumpe, so entsteht ein isentroper SWS-Energiespeicher, weil das System im Fall einer idealen Wärmepumpe und einer idealen Wärmekraftanlage reversibel (umkehrbar) arbeitet.

II. ADS

Die *Abbildungen 2c und 2d* zeigen die nicht-isentrope beziehungsweise isentrope Variante für die Druckluftspeicherung:

(2c) Ein Druckluftspeicher ist in der Regel kein isentroper Energiespeicher weil bei der Kompression von Luft irreversibel Wärme produziert wird und bei der Expansion Wärme von außen zugeführt werden muss.

(2d) Durch Zwischenspeicherung der Kompressionswärme in einem Wärmespeicher und Verwendung dieser Wärme bei der Expansion entsteht ein adiabatischer Druckluftspeicher (ADS) der einen isentropen Energiespeicher verkörpert.

In herkömmlichen Druckluftspeichern, so wie sie in Huntorf (Deutschland) und MacIntosh (USA) existieren, wird Luft mittels elektrischer Energie auf einen Druck in der Größenordnung von 60 bar komprimiert, abgekühlt und in einer unterirdischen druckfesten Kaverne gespeichert. Bei Strombedarf wird die komprimierte Luft mit fossiler Heizung über eine Turbine entspannt und dabei elektrische Energie ins Netz zurückgespeist. Anhand einer elementaren Rechnung unter Verwendung der Formel für die Entropie eines idealen Gases lässt sich zeigen, dass bei einer adiabatischen Kompression gefolgt von einer Abfuhr der Kompressionswärme an die Umgebung Entropie produziert wird. Ebenso lässt sich nachweisen, dass bei einer adiabatischen Expansion (verbunden mit einer Abkühlung) und einer anschließenden Aufnahme von Wärme aus der Umgebung ebenfalls Entropie erzeugt wird. Diese beiden Entropieproduktionsprozesse sind dafür verantwortlich, dass der Wirkungsgrad herkömmlicher Druckluftspeicher (*Abbildung 2c*) auf etwa 50 % beschränkt ist.

Könnte man die Kompression der Luft hingegen unendlich langsam und isotherm durchführen, so würde die Entropie des thermodynamischen Systems bestehend aus komprimierter Luft und Umgebungsluft konstant bleiben. Dies ist in *Abbildung 2d* symbolisiert. Die Zustandsänderung wäre mithin reversibel und elektrische Energie ließe sich verlustfrei in Form von Druck und Umgebungswärme speichern. Dies wäre ein isentroper Energiespeicher. In der Praxis lassen sich Kompressionsvorgänge nicht unendlich langsam durchführen. Deshalb besteht die technische Realisierung eines solchen Speichers in Gestalt des sogenannten adiabatischen Druckluftspeichers darin, dass die beim Komprimieren erzeugte Wärme gespeichert wird, um bei der Expansion wieder verwendet werden zu können. In dem laufenden Projekt ADELE (Adiabatische Druckluftspeicherung von Elektrizität) wird dieses Konzept unter maßgeblicher Beteiligung des DLR im Detail erarbeitet.

III. RBZ

Abbildungen 2e und 2f zeigen die nicht-isentrope beziehungsweise isentrope Variante des RBZ-Speichers:

(2e) Eine Kombination aus einem Elektrolyseur und einer Brennstoffzelle ist in der Regel kein isentroper Energiespeicher, weil in der Brennstoffzelle irreversibel Wärme produziert wird und bei der Elektrolyse Wärme von außen zugeführt werden muss.

(2f) Durch Zwischenspeicherung der in der Brennstoffzelle erzeugten Wärme und Verwendung dieser Wärme im Elektrolyseur entsteht ein isentroper Energiespeicher in Form eines reversiblen Brennstoffzellensystems (RBZ).

In einem „naiven“ RBZ-Speicher wird elektrische Energie mittels eines Elektrolyseurs zur Aufspaltung von Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff eingesetzt. Dies ist ein endothermer Prozess. Zur Rückverstromung werden Wasserstoff und Sauerstoff in einer Brennstoffzelle in einem exothermen Prozess in elektrische Energie zurückverwandelt. Die in *Abbildung 2e* dargestellte Wirkungskette ist durch einen Gesamtwirkungsgrad (Strom zu Strom) von weniger

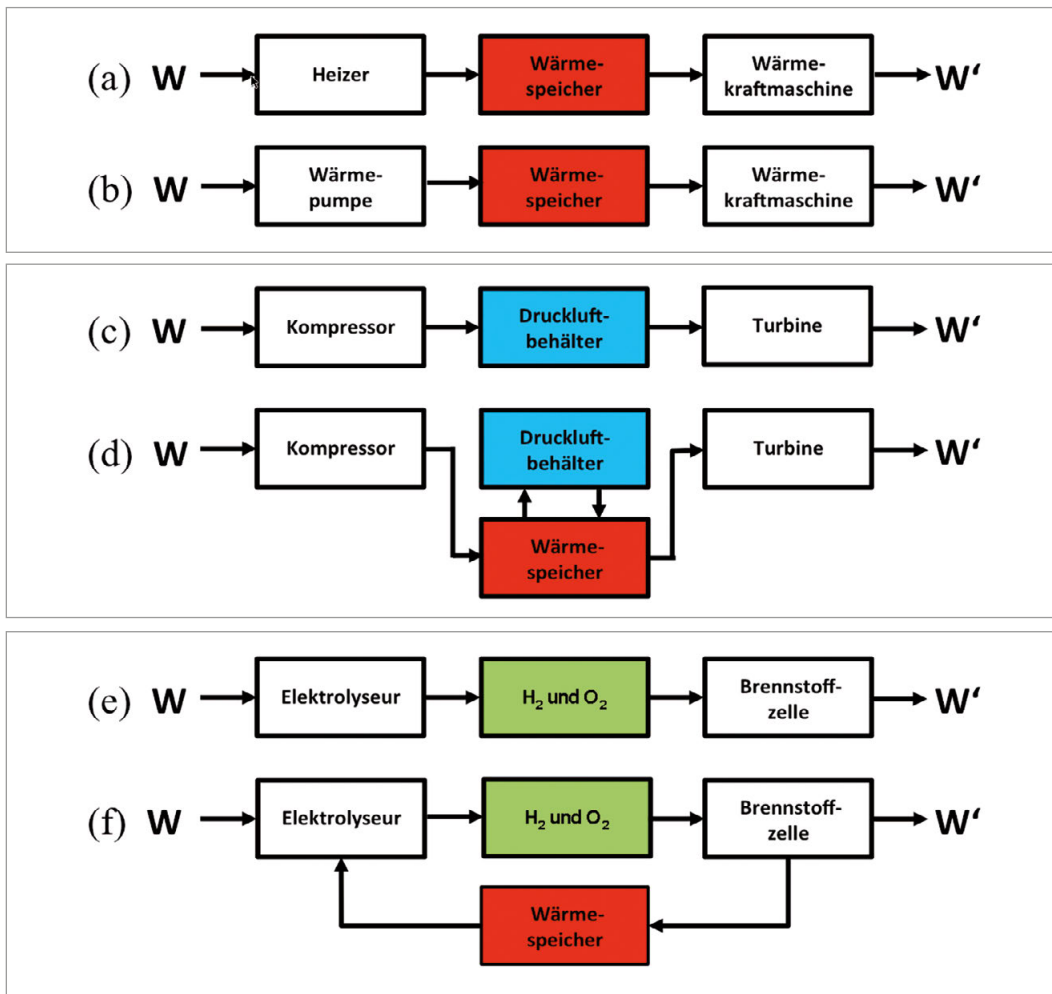


Abbildung 2
Systematik nicht-isentroper und isentroper Energiespeichertechnologien:
(a) nicht-isentroper Strom-Wärme-Strom Speicher,
(b) isentroper Strom-Wärme-Strom Speicher,

(c) nicht-isentroper Druckluftspeicher,
(d) isentroper (adiabatischer) Druckluftspeicher,

(e) nicht-isentropes Elektrolyseur-Brennstoffzellen-System,
(f) isentropes Elektrolyseur-Brennstoffzellen-System

als 50 % gekennzeichnet, weil ein Teil der elektrischen Energie bei der Elektrolyse in Wärme umgewandelt wird und weil die in der Brennstoffzelle gebildete Wärme als Energieverlust an die Umgebung abgeführt wird. Das System in *Abbildung 2e* ist somit nicht isentrop.

Integriert man hingegen einen Hochtemperaturwärmespeicher in das Speichersystem, so kann die in der Brennstoffzelle abgegebene Wärme zwischengespeichert und bei der Elektrolyse eingesetzt werden. Im Idealfall lässt sich so ein isentroper RBZ-Speicher realisieren.

Allen drei genannten isentropen Energiespeicherkonzepten ist die zentrale Bedeutung der Wärmespeicherung gemeinsam.

Ausblick und Forschungsbedarf

Obwohl es zu jedem der drei Speicherkonzepte Forschungsaktivitäten gibt, existiert noch keine vereinheitlichte thermodynamisch-ökonomische Theorie der isentropen Energiespeicher, mit der eine zuverlässige Vorhersage der Wirkungsgrade und der Kosten dieser Systeme möglich ist. Es besteht somit die Notwendigkeit, diese Theorie zu erarbeiten und experimentell zu validieren. Auch ist es notwendig, preiswerte und zyklenfeste Wärmespeicher als Kernstück der isentropen Energiespeicherung zu entwickeln. Die erfolgreiche Entwicklung isentroper Energiespeicher kann einen wichtigen Beitrag zur Speicherung großer Mengen Elektroenergie leisten.

Besonderheiten des Wärmemarktes und Konsequenzen für eine erfolgreiche Wärmewende

Die angestrebte CO₂-Reduktion von 80 % – 95 % bis zum Jahr 2050 ist nur möglich, wenn die Energiewende in allen Energiesektoren erfolgt. Trotz großer Potenziale im Bereich Effizienz und erneuerbare Energien weist die Wärmewende bislang jedoch kaum Fortschritte auf. Selbst das Erreichen des bescheidenen Ziels von 14 % erneuerbare Energien bis zum Jahr 2020 erscheint derzeit nicht sicher.

Dies hat allerdings auch nachvollziehbare Gründe. Die Energiewende im Wärmesektor ist wesentlich schwieriger umsetzbar als im Stromsektor, denn der Wärmesektor weist in Bezug auf Technologien, Marktstrukturen, Akteursvielfalt und Kostenstrukturen eine deutlich größere Heterogenität als der Stromsektor auf, was die Umsetzung einer effizienten Politik wesentlich erschwert.

Als Beitrag zu einer fundierten Diskussion über adäquate Politikinstrumente in der Wärmewende hat der FVEE mit seinen Mitgliedsinstituten im September 2015 ein Positionspapier erstellt: „Erneuerbare Energien im Wärmesektor – Aufgaben, Empfehlungen und Perspektiven“¹. Dieses gibt einen umfassenden Überblick über die Herausforderungen und Handlungsoptionen im Wärmesektor und bietet damit eine wichtige Orientierung bei der Gestaltung der Energiewende.

¹ Download unter http://www.fvee.de/fileadmin/publikationen/Politische_Papiere_FVEE/15.EEWaerme/15_FVEE-Positionspapier_EE-Waerme.pdf

Um die Energiewende erfolgreich umzusetzen, plädiert der FVEE für eine deutliche Stärkung des Wärmesektors in der Energiepolitik und eine entschiedene und langfristig angelegte Politik der Wärmewende, die den besonderen Anforderungen des Wärmesektors gerecht wird. Im Folgenden werden ausgewählte Analyseergebnisse und Empfehlungen des Positionspapiers vorgestellt.

Rahmenbedingungen und Charakteristika des Wärmemarktes

Die Wärmewende kann nur erfolgreich sein, wenn sie den spezifischen Bedingungen des Wärmemarktes gerecht wird. Dieser ist geprägt von einer großen Heterogenität und hohen Komplexität, was Eigentümer und Betreiber, Heiztechnologien und Anlagengrößen, sowie Gebäudetypen und Anwendungsfelder angeht. Dabei ist seine künftige Entwicklung stark von externen Faktoren abhängig, beispielsweise der Entwicklung fossiler Energiepreise, den Entwicklungen im Stromsektor (Power to heat) und den Fortschritten bei der Gebäudeeffizienz. **Abbildung 1** veranschaulicht die Struktur des Wärmemarktes und seine komplexen Wechselwirkungen mit der Energiepolitik, der Energieforschung, der Heiztechnikindustrie, der Brennstoffwirtschaft und den Wärmeverbraucher.



Fraunhofer ISE
Gerhard Stryi-Hipp
gerhard.stryi-hipp@ise.fraunhofer.de

IZES
Juri Horst
horst@izes.de

ISFH
Prof. Dr. Oliver Kastner
kastner@isfh.de

DBFZ
Dr. Volker Lenz
volker.lenz@dbfz.de

Prof. Dr. Daniela Thrän
daniela.thraen@ufz.de

ISFH
Gunther Rockendorf
g.rockendorf@isfh.de

Wuppertal Institut
Dietmar Schüwer
dietmar.schuewer@wupperinst.org

DLR
Evelyn Sperber
evelyn.sperber@dlr.de

Fraunhofer IBP
Hans Erhorn
hans.erhorn@ibp.fraunhofer.de

Abbildung 1
Struktur des Wärmemarktes mit Politikinstrumenten und betroffenen Akteuren



Eine zentrale Herausforderung stellt die Infrastrukturfrage dar. Denn im Gegensatz zum Stromsektor sind verschiedene Infrastrukturlösungen möglich. Ein nachhaltiges Energiesystem ist sowohl mit einer dezentralen Beheizung von Gebäuden mit Biogas oder Synthesegasen aus erneuerbarem Strom (Gasnetz), Wärmepumpen (Stromnetz) oder Holz kombiniert mit Solarwärme, als auch mit einer zentralen Wärmeversorgung mit Kraft-Wärme-Kopplung (Nahwärmenetze) möglich. Aus Gründen der Primärenergieeffizienz sind die aufwendig hergestellten Bio- und Synthesegase nur in Kraft-Wärme-Kopplung einzusetzen. Die *Abbildungen 2 und 3* zeigen das aktuelle Spektrum der Wärmebereitstellung.

Einerseits setzen manche Versorgungsvarianten, wie z. B. der Ausbau der zentralen Kraft-Wärme-Kopplung, einen Ausbau von Infrastruktur voraus (z. B. Wärmenetze). Andererseits sind aufgrund der Unsicherheiten in Bezug auf künftige Entwicklungen Infrastrukturentscheidungen im Wärmesektor mit einem hohen Investitionsrisiko behaftet. Scheinbar einfache Lösungen, wie eine verstärkte Nutzung von Strom im Wärmesektor, werden erschwert von den starken saisonalen Wärmebedarfsschwankungen. Und auch die Ressourcenfrage ist ungeklärt in Hinblick auf die Nutzungsgrenzen von Biomasse, tiefer Geothermie und Solarthermie.

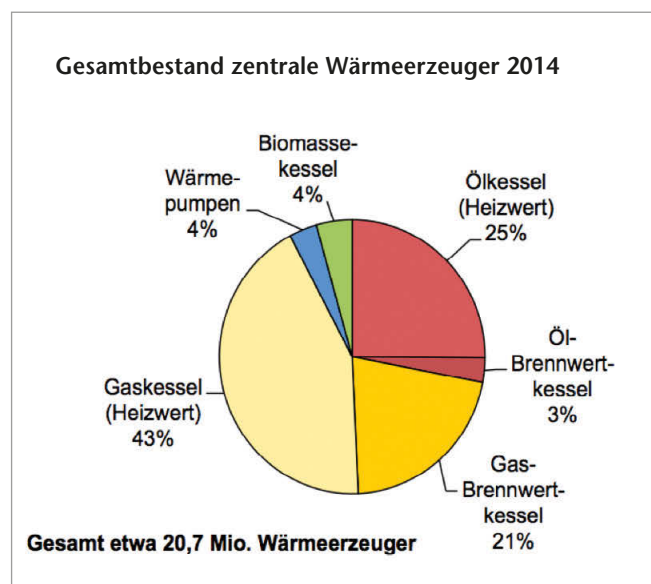
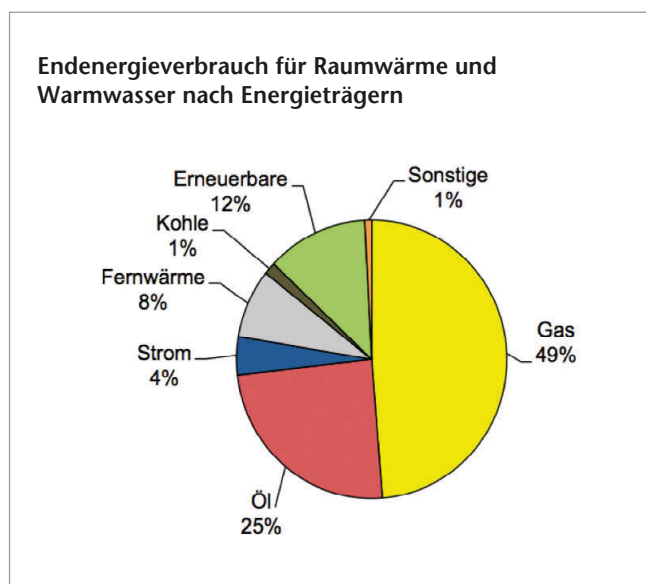
Der Wärmemarkt kann nur verstanden werden, wenn er aus Akteursicht betrachtet wird, denn es gibt eine Vielzahl von Barrieren, die deren Investitionsverhalten entscheidend prägen. Gebäudeeigentümer bzw. Bauherren wägen mit dem vorhandenen Wissen ab, ob sich eine Investition in erneuerbare Wärmetechnologien lohnt und ob ausreichend Kapital vor-

handen ist. Sind diese Bedingungen nicht erfüllt, wird die Sanierungsinvestition entweder zugunsten fossiler Wärmetechnologien getroffen oder gar nicht realisiert. Das hat folgende Gründe:

- Fehlendes Wissen über die Wirtschaftlichkeit verunsichert die Entscheider über die „richtige“ Wahl des Energieträgers bzw. Versorgungssystems und den richtigen Zeitpunkt der Sanierung.
- Diskontinuität in der Förderung erhöht die Unsicherheit der Sanierungsentscheidung.
- Die Eigentumsstruktur des Wohnungsbestands in Deutschland (Mietquote ca. 53 %) dämpft die Dynamik energetischer Sanierungen: Sanierungsbedingte Mietkostenerhöhungen, die nicht in gleichem Umfang durch eingesparte Nebenkosten kompensiert werden, bedeuten für viele Mieter eine finanzielle Überforderung und können vom Vermieter nur begrenzt an die Mieter weitergegeben werden.
- Der energetische Standard eines Gebäudes (Gebäudehülle) hat Einfluss auf den Wärme- und Leistungsbedarf und damit auf die mögliche Anlagentechnik, die entsprechend dem Sanierungsstand angepasst werden muss.
- Die Wohnungswirtschaft ist räumlich inhomogen strukturiert. In einigen Regionen (z. B. des Ruhrgebietes oder im Osten Deutschlands) sind die Akteure mit den gesetzlichen Anforderungen zur energetischen Sanierung (EnEV) bzw. mit der Integration erneuerbarer Wärme teilweise schon finanziell überfordert. In Regionen mit hohen Mietpreisen und -erträgen, insbesondere in den Metro-

Abbildungen 2 und 3
Struktur der Wärmebereitstellung:
 Abb. 2: nach Energieträgern
 Abb. 3: nach Wärmeerzeugern
 (Grafiken: DLR)

2 Statistisches Bundesamt: Mikrozensus – Zusatzerhebung 2010: „Bestand und Struktur der Wohneinheiten – Wohnsituation der Haushalte“, Abbildung 4



polen, ist zwar das Kapital für energetische Sanierungen vorhanden, oftmals ist aber wegen der bereits hohen Mieten die weitere Anhebung (der Kaltmiete) nicht mehr sozialverträglich möglich.

Empfehlungen zur Weiterentwicklung des Wärmemarktes

Der Gesetzgeber muss mit regulatorischen Instrumenten die Steigerung der Energieeffizienz und die Verbreitung von erneuerbaren Energien deutlich stärker als bisher stimulieren. Er sollte dabei folgende technologieübergreifende Aspekte berücksichtigen:

- Eine beschleunigte Transformation des Wärmesektors erfordert sowohl einen Technologieentwicklungsschub durch verstärkte F&E als auch verstärkte Markteinführungshilfen.
- Die Bedeutung der einzelnen Wärmetechnologien für eine nachhaltige Wärmeversorgung ist nur aus einer ganzheitlichen Betrachtung des Energiesystems und der Verknüpfungen der Wärme-, Strom- und Mobilitätssektoren zu bewerten. Deshalb müssen Instrumente zur Bewertung der Rolle von Einzeltechnologien im Gesamtenergiesystem Strom/Wärme/Mobilität entwickelt werden, wobei energetische, ökologische und ökonomische Aspekte zu berücksichtigen sind.
- Zur Erreichung der anspruchsvollen CO₂-Minderungsziele müssen prinzipiell alle technologischen Ansätze im Bereich Energieeffizienz und EE-Wärme sowohl im Gebäudebestand als auch im Neubau genutzt werden. Um eine rasche Entwicklung von Technologien zu erreichen, die sich auf unterschiedlichem Entwicklungsstand bewegen, ist die Unterstützung von F&E und Markteinführung technologiespezifisch erforderlich.
- Generell müssen F&E und Markteinführung eine Vielfalt an nachhaltigen Versorgungsoptionen gewährleisten, da sowohl die Investoren in ihren Motivationen und Argumenten als auch die Anwendungsfälle sehr heterogen sind und deshalb auch künftig eine große Bandbreite an Lösungen eingesetzt werden wird.
- Die gesetzlichen Effizienzanforderungen im Neubau müssen schrittweise erhöht werden, um die Weiterentwicklung der Effizienz- und erneuerbaren Wärmetechnik zu stimulieren.
- Künftig muss der Gebäudebestand wesentlich stärker adressiert werden, um entweder durch Anreize (wie z. B. Zuschüsse oder Steuerabschreibung) oder durch Pflichten (wie z. B. Sanierungspflicht) eine signifikante Erhöhung der energetischen Sanierungsrate auf 3 % jährlich zu erreichen. Die Instrumente und ihre Wirksamkeit sind bekannt, so dass die Politik entscheidungsfähig ist.
- Aufgrund der hohen Heterogenität der Marktakteure, Investoren und Technologien bedarf eine erfolgreiche Wärmewende der Klarheit und Kontinuität in der Politik, um nennenswerte Ergebnisse zu erzielen. EEWärmeG und EnEV sowie alle anderen Instrumente im Wärmemarkt sollten auf ihre Verständlichkeit und Klarheit bezüglich ihrer Wirkung auf den Wärmemarkt hin untersucht und besser aufeinander abgestimmt oder miteinander verschmolzen werden, um Zielsetzungen und Maßnahmen zur Deckung zu bringen. Außerdem müssen die Praxistauglichkeit und Wirksamkeit der Instrumente überprüft werden.
- Fördermaßnahmen im Wärmesektor sollten, den positiven Erfahrungen aus dem Stromsektor folgend, stärker ertragsorientiert ausgestaltet werden und sich an der Differenz zur Kostendeckung orientieren. Deshalb sollten alle EE-Wärmeerzeugungsanlagen nachvollziehbare Einrichtungen zur Effizienzkontrolle bzw. Ertragskontrolle aufweisen.
- Umsetzungskontrollen von gesetzlichen Anforderungen sollten auf Wirksamkeit hin überprüft werden und in allen Bundesländern zur Pflicht werden.
- Die bisher eher auf Einzelanlagen ausgerichteten Fördermaßnahmen müssen durch Ansätze zur Systemintegration in das Gebäude oder das Quartier ergänzt werden.
- Sinnvoll ist eine verbindliche Einführung von Gebäudesanierungsfahrplänen. Dadurch sollen Lock-in-Effekte vermieden werden und, dass einzelne Sanierungsschritte unkoordiniert und möglicherweise unter Zeitdruck erfolgen. Nach Durchführung einer Kette von Teilsanierungen soll sich ein effizientes Ganzes ergeben.

Zur Steuerung der Wärmewende sind diese Punkte erforderlich:

- Die Wirksamkeit von umgesetzten technischen Maßnahmen zur energetischen Ertüchtigung muss regelmäßig überprüft werden, wobei der ökonomische Aufwand und die aus der Planung resultierenden Erwartungswerte berücksichtigt werden.
- Bei unter den Erwartungen liegenden Ergebnissen müssen die Systeme entlang der vollständigen Wirkungskette von den Komponenten und dem System über Planung, Installation und Betrieb analysiert werden.
- Die Ergebnisse aus diesen transdisziplinär durchzuführenden Felduntersuchungen müssen genutzt werden, um im Rahmen eines langfristig angelegten kontinuierlichen Verbesserungsprozesses eine zielgerichtete Planung der Wärmewende zu erreichen.

Darüber hinaus sind folgende übergeordnete Punkte bei der Weiterentwicklung des Wärmemarktes zu berücksichtigen:

- Eine wesentliche Zukunftsaufgabe ist die Auflösung des Investitionsstaus in der Gebäude- und Wärmeanlagentechnik. Wenn Gebäudeeigentümer ihre Wärmeanlagen modernisieren, sollte es zur Pflicht werden, die Möglichkeiten zur Integration erneuerbarer Wärme zu prüfen. Dazu gehört auch der Übergang von Einzelgebäudeversorgungen zu Quartiers- bzw. Nahwärmeversorgungsstrukturen mit KWK oder EE. Da Quartiersversorgungen nicht von den einzelnen Gebäudeeigentümern geprüft werden können, sind Konzepte zu entwickeln, um die Prüfung von übergeordneten Institutionen zu ermöglichen (z. B. durch Erstellung von kommunalen Wärmeplänen).
- Nahwärmenetze mit EE und KWK sind für die Umsetzung nachhaltiger Wärmeversorgungsstrukturen unverzichtbar. Deren Ausbau erfolgt allerdings unter den aktuellen rechtlichen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen nicht mit ausreichender Geschwindigkeit. Deshalb müssen Ausbaupläne auf Basis von fundierten Hemmnisanalysen wissenschaftlich erarbeitet und notwendige politische Instrumente entwickelt werden.
- In Felduntersuchungen und Evaluationen neuer Technologien müssen kontinuierlich Umsetzungserfahrungen gesammelt und mögliche Konsequenzen auf die Markteinführungspolitik geprüft werden.
- Kommunikationsmaßnahmen zur Reduzierung sozio-kultureller Sanierungshemmnisse sollten verstärkt werden (Best-Practice-Sammlungen, Amortisationsrechner, Imagekampagnen).
- Schließlich sind die Baugewerke von der Planung über die Ausführung bis zum Betrieb als unverzichtbare Akteure wesentlich stärker zu adressieren.
- Ein weiteres Instrument stellt die Entwicklung und Implementierung von Demonstratoren dar, die optimaler Weise als Verbundprojekte zwischen der Wissenschaft und der Wirtschaft entwickelt werden. Es ist plausibel, dass die Wärmewende nicht als homogen-gleichzeitiger Prozess vollzogen werden kann, sondern als gradueller Nukleations- und Wachstumsvorgang. Geeignete Standorte weisen erhöhte Innovationspotenziale und somit erhöhte Implementierungsakzeptanz auf. Die Identifizierung solcher Nukleations-Topologien ist entscheidend für erfolgreiche Pilot- und Demonstrationsvorhaben. Neben den energie-wirtschaftlichen Planungsdaten spielen hier die Einschätzungen und Meinungen der lokalen Handlungsträger eine wichtige Rolle. Zu ihrer Einbeziehung rücken diskursive „Bottom-Up“ Entwicklungsansätze in den Vordergrund.

Wirtschaftliche und technische Aspekte der Dekarbonisierung des Wärmesektors

Die Transformation des Energieversorgungssystems zu einer de-karbonisierten Energiebereitstellung bedingt ein koordiniertes Zusammenspiel der Sektoren Strom, Wärme und Verkehr. Dabei ist die Kopplung des Stromsektors mit dem Wärmesektor eine der entscheidenden Maßnahmen bei der Transformation. Die Aufnahme von Wind- und Sonnenenergie in das Netz kann durch genaue Einspeiseprognosen optimiert werden, die Kopplung zum Wärmesektor mittels Wärmepumpen und Power-to-Heat (Heizstab) ermöglicht die weitere Flexibilisierung der Nachfrageseite. Diese Interaktion wird durch intelligente Lösungen der Systemtechnik für das Energie- und Netzmanagement ermöglicht. Die Entwicklung von entsprechenden Anreizsystemen, Marktmechanismen und Geschäftsmodellen ist ebenfalls erforderlich, um diese Kopplung auch wirtschaftlich erfolgreich zu gestalten. Der Beitrag stellt das im Forschungsvorhaben „Interaktion EE-Strom, Wärme und Verkehr“ erstellte 80 %-Szenario für das Jahr 2050 vor und zeigt anhand von Beispielen zukünftige Anforderungen und Entwicklungen zu dieser Thematik auf.

1. Randbedingungen

Für die Erreichbarkeit der Klimaziele sind Wind und PV die tragenden Säulen, da sie relativ kostengünstig mit hohem technischem Ausbaupotenzial verfügbar sind und auch zu hohem Teil den sektorübergreifenden Strombedarf decken können.

Im Projekt wurde untersucht, wie die Schnittstellen zwischen Stromsektor und dem gesamten Energieversorgungssystem ausgestaltet werden müssen. Es wurde bewertet, wie hoch der Strombedarf in einem kostenoptimierten, sektorenübergreifenden Zielszenario sein könnte, wenn das klimapolitische Ziel einer Reduktion der Treibhausgase (THG) um 80 % bis zum Jahr 2050 erreicht werden soll. Die damit verbundenen Herausforderungen hinsichtlich der zeitlichen Vereinbarkeit von dargebotsabhängigem Stromangebot und nur teilweise flexibler Stromnachfrage werden unter den entstehenden Synergien und Rückkopplungen zwischen den Sektoren betrachtet. Mit einem sektorenübergreifenden Zubauoptimierungsmodell wurde ein Energieversorgungssystem für das Jahr 2050 bestimmt, bei dem die Kosten (Betriebskosten, Investitionen inkl. Infrastruktur) in Summe über den Strom-, Wärme- und Verkehrssektor minimal sind.



Fraunhofer IWES
 Dr. Kurt Rohrig
 kurt.rohrig@iwes.fraunhofer.de
 Prof. Dr. Clemens Hoffmann
 clemens.hoffmann@iwes.fraunhofer.de
 Norman Gerhardt
 norman.gerhardt@iwes.fraunhofer.de

Fraunhofer IBP
 Dr. Dietrich Schmidt
 dietrich.schmidt@ibp.fraunhofer.de
 Patrick Schumacher
 patrick.schumacher@ibp.fraunhofer.de

Fraunhofer ISE
 Prof. Dr. Hans Martin Henning
 hans-martin.henning@ise.fraunhofer.de
 Andreas Palzer
 andreas.palzer@ise.fraunhofer.de

Wuppertal Institut
 Prof. Dr. Stefan Lechtenböhrer
 stefan.lechtenboehmer@wupperinst.org

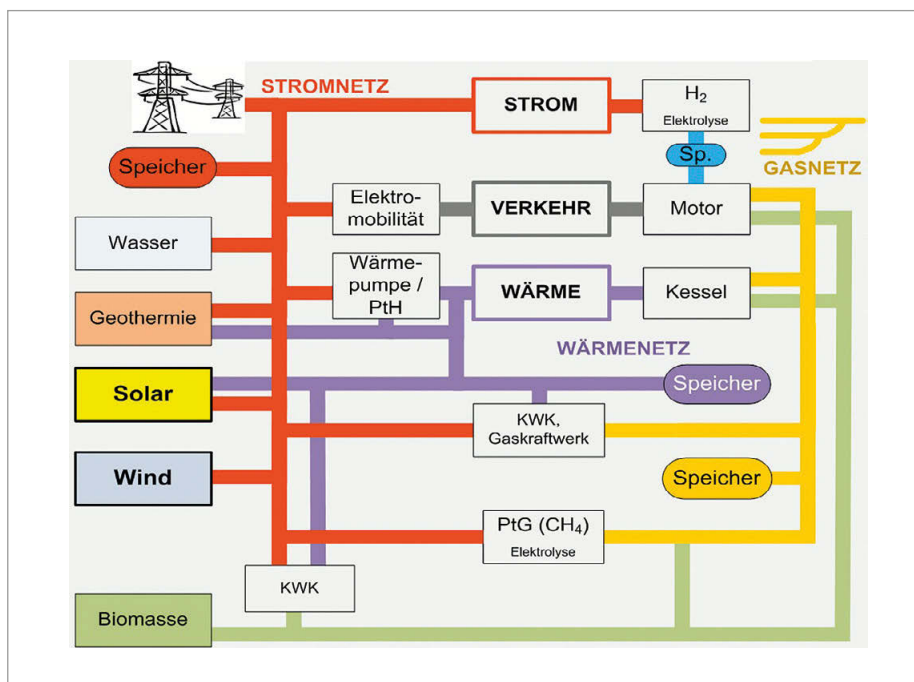


Abbildung 1
 Interaktion und Sektorkopplung
 Quelle: angelehnt an [Stern, M. 2009]

Mögliche Entwicklungsoptionen von wichtigen Eingangsgrößen wurden dabei vorab im Rahmen von Sensitivitätsrechnungen analysiert und bewertet (Gebäudedämmung, Biomassekonversion, verschiedene Verkehrsinfrastruktur und Technologienoptionen im Bereich Pkw und Lkw).

Neben den THG-Minderungsanforderungen für Deutschland (–80 % gegenüber 1990, alle Sektoren inkl. internationaler Verkehr) wurde auch für Europa ein THG-Minderungsziel von –80 % unterstellt (Ziel der EU). Dies führt – aufgrund des gegenwärtigen Flugverkehrsanstieg und des notwendigen Lastenausgleichs zwischen den Ländern – zu einem ambitionierteren Ziel für Deutschland von –30 % gegenüber dem nationalen Kyoto-Protokoll (bzw. –86 % statt –80 % THG-Minderung).

Zudem wird unterstellt, dass vor dem Hintergrund des prognostizierten globalen Bevölkerungswachstums und sich dadurch verschärften Nutzungskonkurrenzen, Biomasse, insbesondere Energiepflanzen, nur restriktiv für energetische Zwecke genutzt werden (keine Importe, kein Ausbau der bestehenden Anbaufläche von ca. 2 Mio. ha).

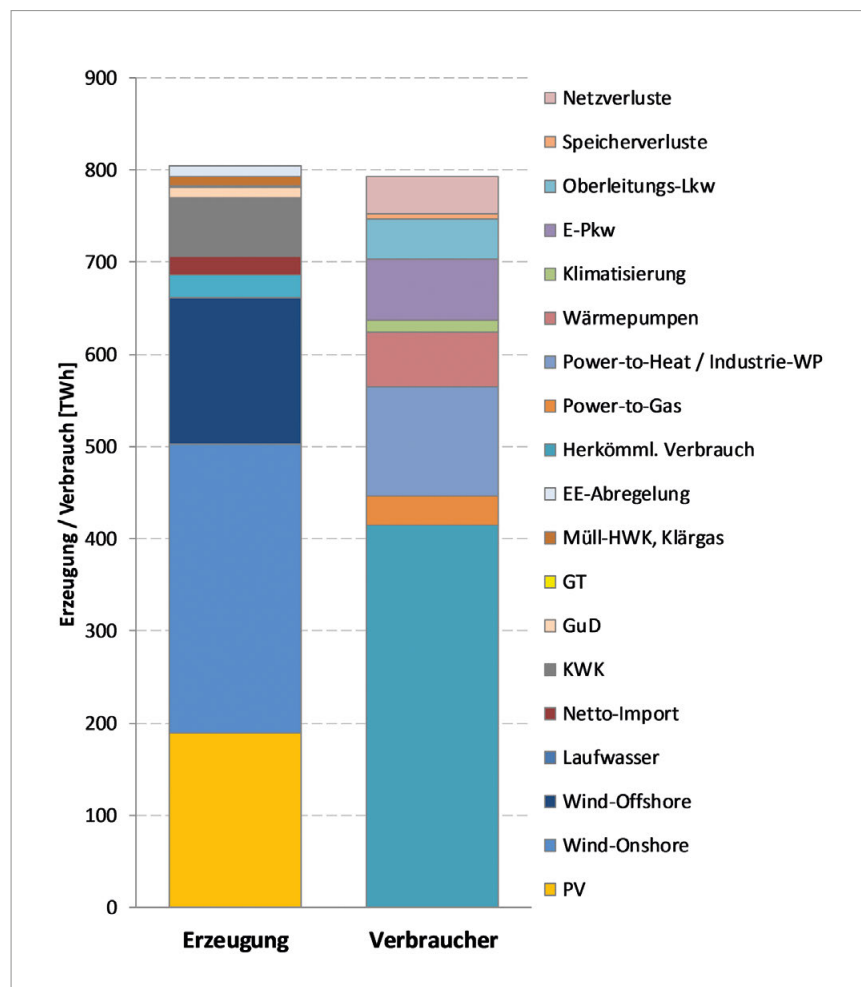
Alle folgenden Ergebnisse beziehen sich auf dieses kostenoptimale Energieversorgungssystem des Jahres 2050.

2. Ergebnisse Stromerzeugung und -verbrauch im Jahr 2050

Unter den vorgegebenen Randbedingungen – bei denen vor allem mittels Wind- und Solarenergie auch die Nachfragen im Wärme- und Verkehrssektor weitestgehend klimaneutral erzeugt werden – resultiert ein jährlicher Strombedarf von 793 TWh/a (netto, inkl. Netz- und Speicherverluste) in Deutschland (gegenüber ca. 540 TWh/a für 2014).

Hierbei werden die Effizienzpotenziale zur Verbrauchsreduktion bei heute bestehenden Stromanwendungen (herkömmlicher Verbrauch) umgesetzt – der Strombedarf geht hier von 538 TWh/a auf 415 TWh/a zurück. Andererseits kommt es zu einem hohen Zuwachs an neuen stromnutzenden Anwendungen (siehe *Abbildung 2*).

Abbildung 2
Energiebilanz
Deutschland 2050



2.1 Strom im Wärmesektor

Die Modellrechnungen zeigen, dass zur Erreichung des THG-Reduktionszieles unter den gegebenen Randbedingungen eine starke Elektrifizierung des Wärmesektors notwendig ist.

Zum einen werden effiziente Technologien wie Wärmepumpen (WP) statt z. B. Heizstäben eingesetzt, um den bereits hohen Strombedarf nicht noch weiter zu erhöhen, da durch die weitgehende Elektrifizierung der Wärmebereitstellung der Flächenverbrauch für die hohen EE-Erzeugungsleistungen eine große Herausforderung darstellt.

Zum anderen werden hoch flexible bivalente Systeme benötigt, um die fluktuierenden erneuerbaren Energien in das Stromsystem mit möglichst geringem Stromspeicherbedarf einbinden zu können.

In *Abbildung 3* ist der optimierte Technologiemix im Wärmesektor für das Basisszenario dargestellt:

- Bei Einfamilienhäusern (EFH) kommt es zu einer sehr hohen Durchdringungsrate für WP, wobei durch technische Restriktionen ein Teil auf Luft-WP entfällt.

Abbildung 3
Technologiedurchdringung Wärmemarkt

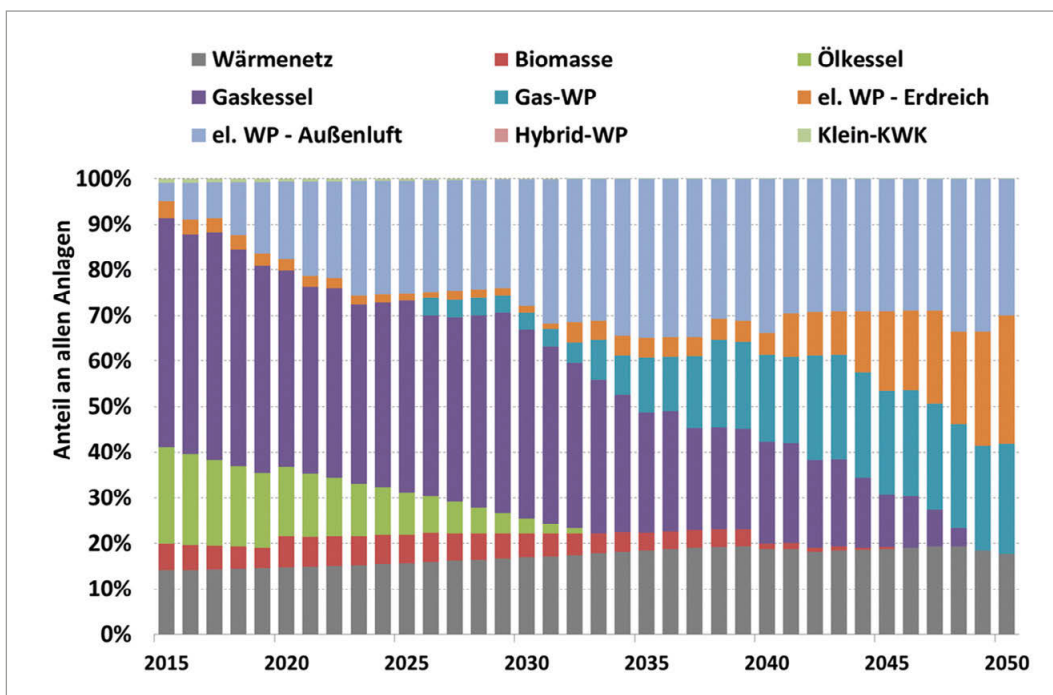
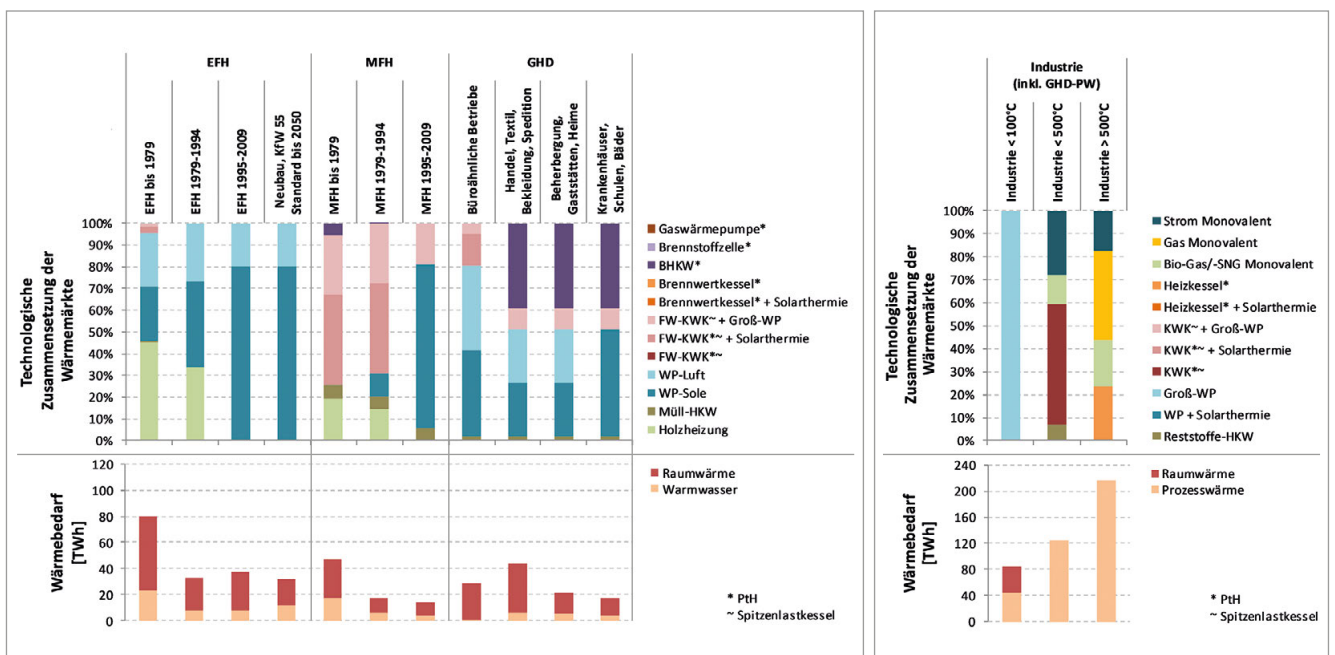


Abbildung 4
Zeitliche Entwicklung der Heizungstechniken

- Bei Mehrfamilienhäusern (MFH) werden je nach Baualterklasse neben WP auch komplexe bivalente Fern- oder Nahwärmesysteme eingesetzt, die teilweise mit Groß-WP kombiniert sind.
- Im Bereich der Gewerbeanwendungen (GHD) werden die WP durch bivalente BHKW-Systeme (KWK + Heizpatrone) ergänzt.
- Im Hochtemperatursektor wird, wo möglich, auf Effizienz gesetzt. Bei Warmwasser unter 100 °C werden daher Groß-WP eingesetzt, bei Prozessdampf bis 500 °C KWK-Systeme mit Elektrodenkesseln und für Prozesswärme über 500 °C neben Biomasse und Gas auch vermehrt Strom.

Ein wesentlicher Faktor, der einen starken Einfluss auf das Design des zukünftigen Energiesystems hat, sind die Fortschritte, die im Bereich der Gebäudesanierung und -dämmung erreicht werden können. Das politische Ziel ist die Erhöhung der Sanierungsrate im Gebäudebestand auf 2 % pro Jahr und eine Reduktion des Wärmebedarfs um 20 % bis 2020 sowie des (fossilen) Primärenergiebedarfs um 80 % bis 2050. Dadurch soll bis 2050 ein nahezu klimaneutraler Gebäudebestand entstehen.

Zusätzlich zur Sanierungsrate hat die Sanierungstiefe einen Einfluss auf den künftigen Energiebedarf im Gebäudesektor. Dieser wird im Projekt durch eine Variantenrechnung untersucht. Eine höhere Sanierungstiefe verringert zum einen den Endenergiebedarf im Haushalts- und Gewerbe-Bereich und zum anderen ermöglicht der Einsatz von Niedrigtemperatur-Heizsystemen wie beispielsweise Flächenheizungen den effizienten Einsatz von WP.

2.2 Regulatorischer Rahmen der Schlüsseltechnologien Wärmepumpen und Elektrodenheizkessel

Die derzeitige Marktdurchdringung der strombasierten Wärmetechnologien wird im Wettbewerb mit fossilen Referenztechnologien dadurch rechtlich gehemmt, dass die Stromnutzung eine deutlich höhere Kostenbelastung im Vergleich zu fossilen Brennstoffen aufweist. Dies ist darin begründet, dass die geltenden rechtlichen Rahmenbedingungen im EEG, Stromsteuergesetz etc. eine nahezu vollständigen Belastung der Strombezugskosten für strombasierte Wärmetechnologien – wie insbesondere Power-to-Heat [2] – mit allen staatlich induzierten Stromkostenbestandteilen verursachen (vor allem der EEG-Umlage, den Netzentgelten und der Stromsteuer). Diese Wettbewerbsnachteile können durch vorhandene staatliche Förderungen und Privilegierungen in ordnungsrechtlichen Vorschriften nicht ausreichend ausgeglichen werden.

Für den Einsatz von Elektrodenheizkesseln als einer PtH-Anwendung in bivalenten Fernwärmesystemen besteht bislang lediglich eine mittelbare finanzielle Förderung in Form der Wärmenetze- und Wärmespeicherförderung im KWKG. Jedoch ist es wirtschaftlich unattraktiv, überschüssigen EE-Strom, der z. B. aufgrund negativer Börsenpreise aberegelt wird, zur Wärmeerzeugung zu nutzen [5].

3. Fazit

Zur Erreichung eines nachhaltigen Energiesystems ist eine verstärkte Interaktion der Sektoren Strom und Wärme notwendig.

Strombasierte Technologien auf Basis regenerativer Erzeugung stellen eine kostengünstige und effiziente Möglichkeit zur CO₂-Reduktion im Wärmesektor dar. In Hinblick auf den steigenden Strombedarf und dem damit zusammenhängenden zusätzlichen Flächenverbrauch für Wind- und Solarkapazitäten sind die Effizienz im Wärmesektor und ein Fortschreiten der Gebäudesanierung bedeutende Hebel zur Erfüllung der gesteckten CO₂-Ziele.

Dezentrale und zentrale WP für Haushalte, Gewerbe, Fernwärme sowie Industrie ist die Schlüsseltechnologie zur effizienten Erhöhung des EE-Anteils im Wärmesektor. Der Anteil der WP sollte kontinuierlich gesteigert werden. Unmittelbar bestimmt die energetische Sanierung und damit auch die Systemtemperaturen die Effizienz der WP. Weiter spielt auch die Flexibilisierung des Wärmesektors eine bedeutende Rolle; vermehrt sollten flexible bivalente Hybridsysteme wie beispielsweise KWK + PtH eingesetzt werden. Begrenzt verfügbare holzartige Biomasse sollte besonders dort eingesetzt werden, wo Temperaturen nicht weiter reduziert werden können, was in ländlich geprägten Altbauten als auch in der Industrie mit Temperaturen größer 100 °C der Fall ist. Schließlich ist auch eine Transformation der Fernwärmenetze zwingend nötig, denn nur bei geringen Netztemperaturen ist ein Einsatz von Groß WP und Solarthermie möglich und sinnvoll, sie bleiben aber trotz hohen Kosten eine bedeutende Technologie zur Versorgung von Stadtteilen mit hoher Wärmedichte.

Um diese Entwicklungen zu unterstützen, sollten strombasierte Anwendungen von einzelnen staatlich induzierten Stromkostenbestandteilen befreit [3] und die Stromsteuer im Rahmen der europäischen Vorgaben der Richtlinie 2003/96/EG reduziert werden. Die Einführung einer verfassungskonform ausgestaltbaren dynamischen EEG-Umlage sowie die Verlagerung der Stromsteuer auf die Energiesteuer für fossile Wärmeerzeuger könnten einen Beitrag dazu leisten, diese Ziele zu erreichen [4].

Die finanzielle und sonstige Förderung der effizienten Wärmetransformationstechnologien sollte intensiviert sowie generell die ungleiche Kostenbelastung zwischen Strom einerseits und Gas und Öl andererseits beseitigt werden. Dies könnte durch eine ebenfalls verfassungskonform ausgestaltbare sektorübergreifende CO₂-Abgabe als Modifikation einer bestehenden Energiesteuer erreicht werden.

4. Literatur

- [1] IWES/IBP/IFEU/SUER: Abschlussbericht Projekt „Interaktion EE-Strom, Wärme und Verkehr“, 2015 {<http://publica.fraunhofer.de/dokumente/N-356297.html>}
- [2] Peter Birkner/Oliver Antoni/Johannes Hilpert, Rechtliche Rahmenbedingungen für den Einsatz von Power-to-Heat“, Teil 2, EuroHeat&Power 12/2013
- [3] IWES: Stellungnahme zum BMWi-Grünbuch – Pro effiziente Sektorkopplung – Wärmepumpen und Elektromobilität, 2015
- [4] IWES/SUER/IFAM: Power-to-Heat zur Integration von ansonsten abgeregeltem Strom aus Erneuerbaren Energien, 2014

Treiber und Hemmnisse für die Wärmewende – die Rolle der Kommunen



IZES

Prof. Frank Baur
baur@izes.de

Florian Noll
noll@izes.de

Fraunhofer IWES

Dr. André Bisevic
andre.bisevic@iwes.fraunhofer.de

Wuppertal Institut

Jonas Friege
jonas.friega@wupperinst.org

GFZ/ISFH

Prof. Dr. Oliver Kastner
oliver.kastner@isfh.de

ZSW

Andreas Püttner
andreas.puettnr@zsw-bw.de

Hintergrund

Die Wärmewende ist als Teil der Energiewende ein gesellschaftliches Großprojekt. Für eine erfolgreiche Umsetzung benötigt die Wärmewende im Vergleich zur Stromwende vielfältigere und differenziertere Handlungsmechanismen. Es geht dabei nicht nur um den Ersatz fossiler Energieträger im Bereich der Wärmeversorgung durch regenerative Quellen, sondern vielmehr um einen systemischen Ansatz, der zudem eine stringente Forcierung von Energieeffizienzmaßnahmen, eine optimierte Verzahnung von Strom- und Wärmesystemen sowie eine zielgruppenspezifische Adressierung und Sensibilisierung von Akteursgruppen (hier: Kommunen, Privathaushalte, Industrie, GHD) erforderlich macht.

Im Kontext der Wärmewende haben zudem regenerativ-basierte Versorgungskonzepte einen eher lokalen Charakter und müssen dabei sehr heterogene Anforderungsprofile abdecken.

Die in diesem Zusammenhang zu berücksichtigenden Treiber und Hemmnisse lassen sich grob und stichwortartig folgenden Sektoren zuordnen:

- Technik: Verfügbarkeit technischer Lösungen/ Innovationen (sowie ggf. korrespondierender Energieträger), Akzeptanz, Erfahrungen (Referenzen, Handwerk), Flexibilität im Hinblick auf mittel- bis langfristige Technologiewechsel.
- Ökonomie: Invest-/Betriebskosten, förderpolitische Rahmenbedingungen (Vertrauen), regionale Wertschöpfung, Finanzierungsmodelle/-bereitschaft (Banken, Bürger), Risiko Wärmenachfrage/-dargebot
- Ökologie: Bewusstsein, negative Effekte/Erfahrungen (z. B. Wohnqualität, Entsorgung Dämmstoff), Informationsfluss
- Soziales: Wissen, Einstellung, soziale Norm, Lebensphase (z. B. Familiengründung, Ruhestand), gesellschaftliche Innovationen
- Organisation: Transformationsmanagement/ Prozessabläufe, integrierte Planungen, Verfügbarkeit von Planungsdaten, Infrastrukturen, Aufbau/ Pflege Akteursnetzwerke

Die Kommune als Schlüsselakteur

Insbesondere der Bereich der Organisation gewinnt zunehmend an Bedeutung. Die Kommune nimmt dabei aufgrund ihrer vielfältigen Schnittstellen zu Letztverbrauchergruppen eine wichtige Schlüssel-funktion ein. Sie ist die bürgernächste Verwaltungsebene, Besitzerin und Verwalterin von eigenen Liegenschaften und Einrichtungen (hier: Verbraucher, Versorger, Vorbild), zuständig für operative und strategische Aufgaben, Mittlerin zwischen Interessengruppen und hat kommunale Planungsverantwortung.

Aus kommunaler Sicht ist die Transformation des Energiesystems – nach derzeitiger Einschätzung – weniger eine technische Frage, sondern eher eine Frage der Prozessorganisation und der Governance. Die Untersuchung entsprechender Zusammenhänge im Bereich der kommunalen Planungs- und Entscheidungsabläufe ist daher in einem zunehmendem Maße Gegenstand wissenschaftlicher Untersuchungen.¹

Politik und Wissenschaft haben erkannt, dass die Energiewende kein isoliertes Thema ist, das losgelöst von stadt- oder infrastrukturplanerischen Fragestellungen beantwortet werden kann. Es bedarf daher systemischer, transsektoraler und partizipativer Ansätze, um die nationalen Energiewendeziele auf die lokale Planungs- und Umsetzungsebene zu transferieren.

In diesem Sinne müssen die bestehenden kommunalen Strukturen und Entscheidungsprozesse – zumindest in Teilen – angepasst und ggf. mit einer höheren Verbindlichkeit versehen werden. Viele Maßnahmen im Bereich der Energiewende und des Klimaschutzes erfolgen in den Kommunen – auf der Basis einschlägiger Förderrichtlinien (z. B. der NKI) – freiwillig. Es stellt sich daher die Frage, wie zukünftig Entscheidungen im Sinne der Energiewende auf kommunaler Ebene herbeigeführt werden können bzw. werden sollen. Dabei ist es ggf. erforderlich, in einem stärkeren Maße als bisher Verantwortlichkeiten und Kompetenzprofile in der kommunalen Politik und Verwaltung zu definieren und verbindliche Ziele auf kommunaler Ebene festzulegen.

¹ Zum Beispiel IZES, AEE, EnGovernance – Kommunen als Impulsgeber, Gestalter und Moderator der Energiewende, gefördert durch BMWi, 2014–2016

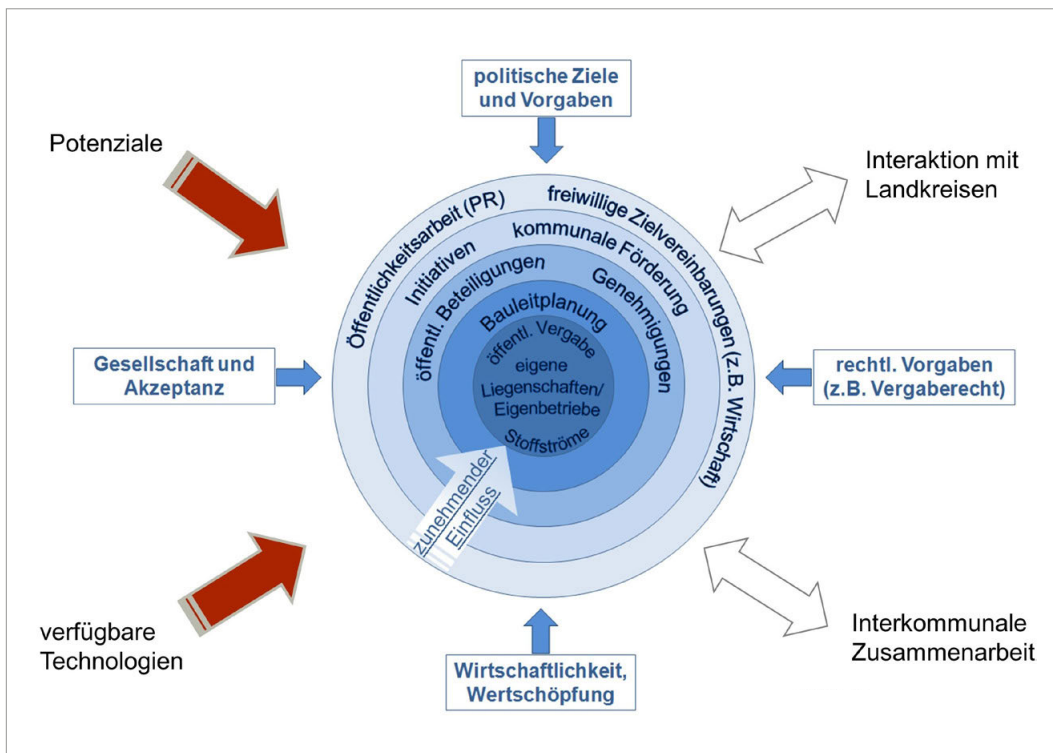


Abbildung 1
Mögliche Einflussphasen einer Kommune
(verändert nach Baur et al., 2015)

Die kommunalen Einflussmöglichkeiten lassen sich in diesem Zusammenhang in einem „Zwiebelmodell“ veranschaulichen (siehe *Abbildung 1*)

Im Zentrum der „Zwiebel“ besteht eine unmittelbare Entscheidungskompetenz seitens der Kommune, wo es z. B. um eigene Liegenschaften, öffentliche Vergaben und „eigene“ Stoffströme (z. B. Abfall, Abwasser, Kommunalwald, etc.) geht. Nach außen hin werden die Einflussmöglichkeiten „weicher“ bis hin zu Maßnahmen im Bereich der Öffentlichkeitsarbeit und im Bereich freiwilliger Zielvereinbarungen. Die Entscheidungsmöglichkeiten sind zudem eingebunden in ein Korsett aus politischen und rechtlichen Vorgaben (z. B. Vergaberecht, Bauleitplanung, kommunale Selbstverwaltung), Aspekten der Wirtschaftlichkeit („Rentierlichkeit“) und Wertschöpfung sowie gesellschaftlichen Fragen (Akzeptanz).

Das zur Verfügung stehende Set (kommunaler) Umsetzungsinstrumente ist sehr vielfältig – wird aber von den Kommunen bislang nur in wenigen Fällen zielgerichtet und effizient zur Unterstützung der Wärme-/Energiewende eingesetzt:

- Satzungen (u. a. Anschluss- und Benutzungszwang)
- Städtebauliche Verträge, Erschließungsverträge, Kaufverträge in Bebauungsplanverfahren zur Einflussnahme auf private Investoren
- Kooperation mit Stadtwerken

- Vorbildfunktion durch die Projektumsetzung in eigenen Liegenschaften
- Wärmekataster als Planungsinstrument
- Leitbild mit Zielformulierung und Strategieentwicklung
- Beratung und Wissensvermittlung

Um zu erreichen, dass die Kommunen diese Instrumente zukünftig in einer optimierten Form einsetzen, müssen sowohl die bestehenden Kommunikations- und Informationsdefizite vor Ort (u. a. mangelhafte Kommunikation in der Verwaltung sowie zwischen den einzelnen Verwaltungsebenen, fehlende Planungsgrundlagen und unklare Zuständigkeiten) aufgelöst, als auch die strukturellen Abläufe von Entscheidungsprozessen angepasst werden.

Hierzu bestehen verschiedene Ansätze. Einer dieser Ansätze ist das Pilotprojekt „Leitstern Energieeffizienz Baden-Württemberg“, das auf der Basis eines innovativen Wettbewerbes auf Ebene der Stadt- und Landkreise den Informations- und Erfahrungsaustausch zwischen den Kreisen selbst, aber auch zwischen Kreis und den zugehörigen Städten und Gemeinden begünstigen soll. Durch die Ergebnisse des Wettbewerbs sollen die Diskussionen sowie das voneinander Lernen angeregt werden. Besonders wichtig ist dabei die Vernetzung der Kommunen, z. B. auch im Hinblick auf transkommunale Ansätze. Dabei ist aktuell zu beobachten, dass auch die Kreisebene vermehrt Energie- und Klimaschutzaktivitäten im Rahmen

eigener Maßnahmen unternimmt und langfristig in der Lage ist, Managementstrukturen für den Energie-/Klimaschutzbereich im Sinne einer Dienstleistung, z. B. für kleinere Kommunen, aufzubauen.

Strategieentwicklungen zur Wärmewende erfordern diskursive Methoden. Für den ostdeutschen Raum konnte modellhaft ein Forum zur Intensivierung des Erfahrungsaustausches, zur Netzwerkbildung und zur Identifizierung lokaler Innovationspotenziale etabliert werden, das diesem Ansatz entsprechen möchte: das Zwanzig20-Forum „Masterplan Energiewende – Wärme neu gedacht!“², dessen BMBF-geförderte finanzielle Ausstattung zu einem signifikanten Teil in die Entwicklung von Demonstratoren fließt.

Gründe für die teilweise noch vorhandene Zurückhaltung der Kommunen bei der Finanzierung von Maßnahmen für die Wärmewende sind die Finanzsituation vieler Städte, Gemeinden und Landkreise, die schwankenden – und derzeit niedrigen – Preise für fossile Energien sowie die instabilen förderrechtlichen Rahmenbedingungen. Zwar wird seitens der Wissenschaft immer wieder gefordert, Klimaschutz und Energiewende als kommunale Pflichtaufgabe festzulegen – nach dem Konnexitätsprinzip müsste dafür jedoch zuvor durch den Bund und die Länder eine finanzielle Grundlage geschaffen werden.

Kommunale Planungsansätze im Bereich der Wärmewende

Wärmekataster können eine wichtige Planungsgrundlage zur Umsetzung der kommunalen Wärmewende sein. Diese weisen jedoch vielfach methodische Schwächen auf:

- Defizite im Bereich der Grunddaten (Genauigkeit, Aktualität)
- Kennwert-basierte Herleitungen (kein regionaler Bezug)
- Keine Einbindung zwischenzeitlich erfolgter Sanierungen im Gebäudebestand

Für eine höhere Aussagekraft für die Kommunen bedarf es einer anwenderfreundlichen Dynamisierung entsprechender Planungsinstrumente.

Geplant werden sollte dabei idealerweise auf Quartiersebene (Gebäudeensemble, Kombination Neu/Bestand). Es hat sich gezeigt, dass dadurch im Vergleich zu marktgetriebenen Einzellösungen optimales Effekte sowohl im Hinblick auf die Minderung von THG-Emissionen als auch hinsichtlich der Kosten erzielt werden können (Hertle et al., 2015).

Darüber hinaus bietet dieser Ansatz die Möglichkeit auch grundsätzlichere Themen in den Planungsprozess einzubinden und mit den Menschen zu diskutieren. Zum Beispiel die Frage, wie Menschen zukünftig zusammen leben möchten (Struktur, Wohn-/Arbeitswelten, Dichte, Identität, etc.). Quartiersplanungen bieten damit eine ideale Basis für partizipative Prozesse, bei denen sowohl das Interesse des jeweiligen (Gebäude-)Eigentümers als auch objektübergreifende Handlungsansätze eingebunden werden können.³ Die Kommune hat dabei die Rolle der Impulsgeberin und Moderatorin, z. B. für Netzwerke, und kann dabei gleichzeitig stadtplanerische, infrastrukturelle und energetische Entwicklungen miteinander verbinden.

Der Faktor Mensch

Bei den angestrebten partizipativen Prozessen stehen die Bürger vor Ort als Nutzer und/oder Eigentümer von Wohngebäuden im Mittelpunkt des Transformationsgeschehens. Ihnen obliegt somit – im Rahmen gesetzlicher und förderrechtlicher Vorgaben – letztendlich die Entscheidung, in die energetische Gebäudesanierung und/oder den Ausbau der erneuerbaren Energien zu investieren. Für den Transfer der nationalen Energiewendeziele auf die lokale Umsetzungsebene und damit für ein zielorientiertes Investitionsverhalten seitens der Eigenheimbesitzer bedarf es demnach eines vertieften Verständnisses sozialer Prozesse und Abläufe.

Die Entscheidungsprozesse von Eigenheimbesitzern sind dabei von diversen Faktoren abhängig. Motive für private Sanierungsentscheidungen können z. B. Kosteneinsparungen, der Werterhalt der Immobilie, die Unabhängigkeit von fossilen Energien u. v. m. sein. Hemmnisse sind dagegen oftmals Überforderung und Hilflosigkeit, Misstrauen, Vorurteile, bauliche und behördliche Restriktionen sowie insbesondere die persönliche finanzielle Situation (siehe *Abbildung 2*). Daneben wird der Entscheidungsprozess Einzelner durch die soziodemografische Situation (persönliche Lebensphase) und die individuellen Einstellungen zum Bauen und Wohnen bestimmt. Jüngste Forschungsergebnisse zeigen, dass vor allem der Hauskauf häufig Anlass für umfangreiche Sanierungsarbeiten ist. Doch häufig verstreicht dieses Gelegenheitsfenster, auch energetisch zu modernisieren, ungenutzt (Stieß et al. 2015).

² Forum basierend auf einem offenen Konsortium aus Forschungsinstituten, Universitäten, KMU und der Energieindustrie [2020-Forum]

³ Die Bundesregierung fördert den Quartiersansatz seit 2011 gesondert im Rahmen des Förderprogramms „Energetische Stadtsanierung“ der Kreditanstalt für Wiederaufbau (KfW).

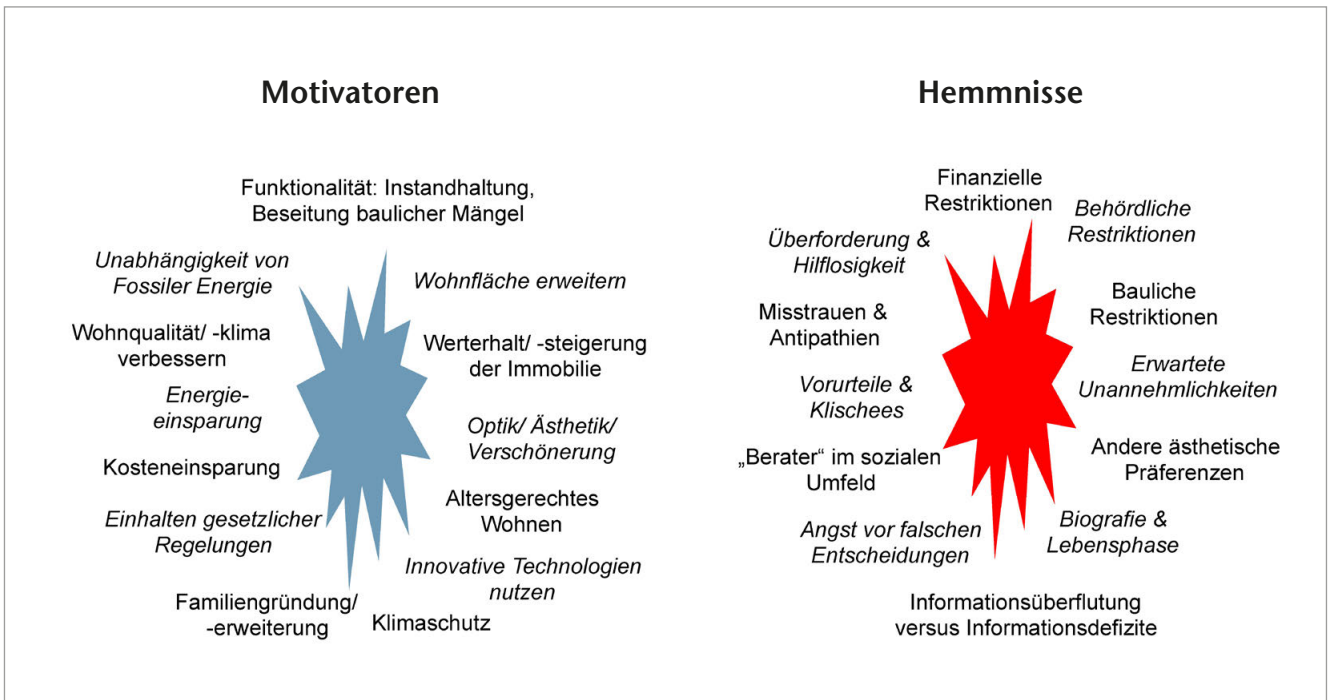


Abbildung 2
Motivatoren und Hemmnisse
 Wirkeinflüsse bei Sanierungsentscheidungen von Eigenheimbesitzern
 (Darstellung von J. Friege (WIKUE) nach Stieß et al. 2009)

Die Kommune kann diesbezüglich – insbesondere bei einem quartiersbezogenen Ansatz – durch Information, Beratung und Unterstützung bei der Finanzierung und Umsetzung sowie durch formale Vorgaben (s. o. unter Umsetzungsinstrumente) Einfluss auf die Entscheidungsfindung von Einzelpersonen nehmen.

Ein weiterer Treiber der Wärmewende könnte durch den – im Vergleich zum aktuellen KfW-Sanierungsprogramm – potenziell besser adressierten Akteurskreis zudem die Einführung von steuerlichen Abschreibungen von Sanierungsmaßnahmen sein. Diese Fördermaßnahme wird seit langem von der Politik diskutiert, konnte sich jedoch v. a. aufgrund von Finanzierungsaspekten (Streit Bund/Länder-Finanzierung) noch nicht durchsetzen.

Fazit

Die Rolle der Kommunen für die Wärmewende kann wie folgt beschrieben werden:

- Kommunen sind wichtige Schlüsselakteure im Rahmen der nationalen Energie- und insbesondere der Wärmewende. An den Bund und die Länder gilt daher der Appell, die Voraussetzungen zu schaffen, um die Kommunen in die Lage zu versetzen, die anstehenden Aufgaben im Rahmen der Wärmewende zu erfüllen (Rechtsrahmen, Verantwortlichkeiten, finanzielle Ausstattung, kommunale Entscheidungsabläufe etc.).

- Ggf. ist die Landesebene im Hinblick auf verbindliche Vorgaben (Freiwilligkeit vs. Verbindlichkeit) stärker zu akzentuieren.
- Hinsichtlich des Transfers der nationalen Energieziele auf die kommunale Planungsebene bedarf es in einem verstärkten Maße systemischer und transsektoraler Ansätze. Diese sollten auch übergeordnete Planungsebenen – z. B. im Sinne der Landkreise – berücksichtigen.
- Im Hinblick auf die kommunalen Planungsgrundlagen bedarf es methodisch weiterentwickelter Verfahren zur Herleitung von Wärmekatastern.
- Quartiersplanungen sind effizienter als marktgetriebene Einzellösungen und ermöglichen einen lokal verankerten gesellschaftlichen Diskurs.
- Ein vertieftes Verständnis sozialer Prozesse – z. B. hinsichtlich der Entscheidungsabläufe bei Eigenheim-/Immobilienbesitzern – ermöglicht die Entwicklung innovativer Politikinstrumente.

Literatur

- Baur, F., Noll, F., Wern, B., Weiler, K., Arnold K., Nühlen, J., Dresen, B. (2015): Nachhaltige Integration von Bioenergiesystemen im Kontext einer kommunalen Entscheidungsfindung – KomInteg. Abschlussbericht. FKZ 03KB066. Saarbrücken, Wuppertal, Oberhausen.
- Hertle, H., Pehnt, M., Gugel, B., Dingeldey, M., & Müller, K. (2015): Wärmewende in Kommunen. Leitfaden für den klimafreundlichen Umbau der

Wärmeversorgung. Im Auftrag und herausgegeben von der Heinrich-Böll-Stiftung, Schriften zur Ökologie, Band 41. Berlin.

- Stieß, I., Birzle-Harder, B., & Deffner, J. (2009): „So ein Haus ist auch die Sparkasse von einem“. Motive und Barrieren von Eigenheimbesitzerinnen und -besitzern gegenüber einer energieeffizienten Sanierung: Ergebnisse einer qualitativen Untersuchung. Frankfurt am Main.
- Stieß, I., Weiß, J., Dehmel, C., Dunkelberg, E., Kunkis, M., Schuldt-Baumgart, N., & Vogelpohl, T. (2015): Kommunikationsstrategie „Wegweiser Hauskauf – Energetisches Modernisieren zahlt sich aus“.
- Zwanzig20-Forum Masterplan Energiewende – Wärme neu gedacht!“. Internet: <http://www.gfz-potsdam.de/zentrum/technologietransferzentren/zwanzig20-forum-waermewende>.

Geschäftsmodelle für die Wärmewende

Die Umsetzung der Wärmewende erfordert in den kommenden Jahren und Dekaden sowohl eine deutliche Reduktion des Energieverbrauchs zur Wärmebereitstellung als auch eine effiziente und zunehmend aus erneuerbaren Energien bereitgestellte Restwärmedeckung. So soll bis zum Jahr 2020 der Wärmebedarf um 20 % gegenüber 2008 gesenkt werden. Parallel sollen die erneuerbaren Energien weiter ausgebaut werden, um im Jahr 2020 einen Anteil von 14 % am Endenergieverbrauch für Wärme und Kälte zu decken. In der Langfristperspektive soll bis zum Jahr 2050 ein nahezu klimaneutraler Gebäudebestand erreicht werden.

Die Wärmewende in Deutschland erfordert nicht nur die Entwicklung und Anwendung neuer und innovativer Techniken und Systemlösungen im Wärmebereich, sondern verlangt nach wirtschaftlich tragfähigen Konzepten zu deren Umsetzung. Mit dem vorliegenden Beitrag wird eine Auswahl etablierter und neuer, innovativer Geschäftsmodelle für die Wärmewende betrachtet.

Weiterhin werden mit (Ab)Wärmeatlanten und der kommunalen Wärmeplanung zwei Instrumente vorgestellt, mit denen Geschäftsmodelle im Wärmesektor unterstützt werden können.

Schließlich wird die wirtschaftliche Bedeutung der Wärmewende anhand der Beschäftigungs- und Wertschöpfungseffekte in den Bereichen erneuerbare Energien und Gebäudesanierung verglichen und diskutiert.

Rahmenbedingungen für Geschäftsmodelle im Wärmemarkt

Der überwiegend dezentral strukturierte Wärmemarkt ist von einer Vielzahl von ordnungsrechtlichen, förderpolitischen und energiewirtschaftlichen Rahmenbedingungen geprägt.

Im Neubau werden überwiegend ordnungsrechtliche Ansätze verfolgt (EnEV, EEWärmeG). Für Bestandsgebäude werden Anreize primär über Förderprogramme für Gebäudesanierungen (KfW-Gebäudesanierungsprogramme) und den Einsatz erneuerbarer Energien (BAFA- und KfW-Förderung im Rahmen des Marktanzreizprogramms) gesetzt. Darüber hinaus wird mit dem Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz die Errichtung und Modernisierung von KWK-Anlagen und Wärmenetzen gefördert.

Trotz der überwiegenden Dezentralität des Wärmemarkts bestehen infrastrukturelle Abhängigkeiten und teilweise zunehmende Konkurrenzen im Hinblick auf Gas- und Wärmenetze. Schließlich herrschen im Wärmemarkt aufgrund der Abhängigkeiten von den Weltmärkten (Erdöl bzw. Erdgas) volatile Preise vor, die die wirtschaftliche Attraktivität von Gebäudesanierungen und den Einsatz erneuerbarer Energie entscheidend beeinflussen.

Etablierte, weiterentwickelte und neue Geschäftsmodelle

So komplex und vielfältig wie der Wärmemarkt sind auch die jeweiligen Geschäftsmodelle. Der vorliegende Beitrag muss sich daher auf eine Auswahl beschränken. Ein Teil der im Folgenden vorgestellten Geschäftsmodelle basiert auf den Anforderungen der voranschreitenden Kopplung und Interaktion von Strom- und Wärmesektor. Im Fokus stehen dabei die flexible, gekoppelte Erzeugung von Strom- und Wärme sowie der flexible Einsatz von Strom im Wärmesektor.

• Energieliefer- und Einsparcontracting

haben sich als weit verbreitetes Geschäftsmodell im Wärmesektor etabliert. Insbesondere das Energieliefercontracting bzw. Wärmecontracting ist weit verbreitet, während sich das Einsparcontracting häufig komplexer gestaltet, da meist parallel verschiedene Effizienzmaßnahmen umgesetzt werden.

Beim klassischen Wärmecontracting übernimmt der Contractor begonnen von der Planung, Finanzierung und der Installation auch den Betrieb der Heizungsanlage einschließlich Wartung, Instandhaltung, Brennstoffversorgung und Energiecontrolling. Im Zuge von Wärmecontracting bzw. Einsparcontracting können oft erhebliche Energie- und Kosteneinsparungen realisiert werden. So weist eine Auswertung der Klimaschutz- und Energieagentur Baden-Württemberg Energie- und Kosteneinsparungen in der Größenordnung von 20 bis 50 % für Contracting-Projekte aus [1]. Von den Einsparungen profitieren sowohl der Contractor als auch die Kunden.

• Flexible Biogasanlagen-Konzepte

Bis zum Jahr 2011 bestand für Biogasanlagen das primäre Geschäftsmodell in einer Maximierung der Stromeinspeisung und EEG-Erlöse sowie in der Vermarktung der gekoppelt erzeugten Wärme. Mit dem EEG 2012 wurde für Biogas- und Biomethananlagen



ZSW

Tobias Kelm
tobias.kelm@zsw-bw.de

Fraunhofer IWES

Patrick Hochloff
patrick.hochloff@iwes.fraunhofer.de

IZES

Juri Horst
horst@izes.de

DLR

Marlene O'Sullivan
marlene.osullivan@dlr.de

badenova WÄRMEPLUS

Klaus Preiser
klaus.preiser@badenova.de

DBFZ

Prof. Dr. Daniela Thrän
daniela.thraen@dbfz.de

Fraunhofer ISE

Prof. Dr. Christof Wittwer
christof.wittwer@ise.fraunhofer.de

die Flexibilitätsprämie (Bestandsanlagen) bzw. der Flexibilitätszuschlag (Neuanlagen) eingeführt, um den Anteil der flexiblen EE-Stromerzeugung zu erhöhen [2]. Mit den Regelungen können nun flexible Anlagenkonzepte im Bereich der Nahwärmeversorgung wirtschaftlich umgesetzt und betrieben werden. Je nach Wärmekonzept sind ein großer bzw. mehrere dezentrale Wärmespeicher für den flexiblen Betrieb eines oder mehrerer BHKW erforderlich.

- **Optimierter Strom-Wärme-Betrieb für BHKW**

Während größere gasbetriebene Blockheizkraftwerke und Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen in der allgemeinen Versorgung i. d. R. am Strompreissignal orientiert betrieben werden, sind kleine BHKW meist wärmegeführt und speisen unabhängig vom Strompreissignal ein – auch zu Zeiten niedriger Preise. Mit der im KWKG 2016 vorgesehenen Verschiebung der Zuschläge hin zur Einspeisung verstärken sich die Flexibilitätsanforderungen von Blockheizkraftwerken. Erste Anlagen nutzen bereits einen vorhersagebasierten Regelungsalgorithmus, der den Strom-Wärme-Betrieb der Anlagen auf Basis externer Tarife optimiert. Auch die Bündelung flexibler KWK-Anlagen im kleinen/mittleren Leistungsbereich zu einem virtuellen Kraftwerk wird heute bereits in wirtschaftlich tragfähigen Konzepten umgesetzt.

- **Nachfrageflexibilität durch PtH**

Zusätzlich zur Flexibilität auf der Bereitstellungsseite können hybride Wärmesysteme durch die Einbindung von Power to Heat (PtH) zusätzliche Nachfrageflexibilität schaffen. Die erforderliche Wärme wird dabei je nach Wärmebedarf und Strompreis flexibel brennstoff- und/oder strombasiert bereitgestellt. In Zeiten von geringen oder negativen Strompreisen kommt PtH je nach Wärmebedarf ergänzend oder auch ohne zusätzlich bereitgestellte brennstoffbasierte Wärme zum Einsatz. In heutigen Betriebskonzepten ist der Deckungsanteil von PtH noch relativ gering, dies stellt jedoch aufgrund der geringen Investitionskosten für den Heizstab keine Einschränkung für den wirtschaftlichen Betrieb des hybriden Wärmesystems dar.

- **Solare Nahwärmesysteme**

In Deutschland erst vereinzelt anzutreffen, in Dänemark jedoch weit verbreitet, sind solare Nahwärmesysteme. So existieren in Dänemark zum Stand Ende 2014 fast 60 solare Nahwärmenetze mit durchschnittlich 10.000 m² Kollektorfläche [3]. Aufgrund der langen Tradition der Energieversorgung in gemeinschaftlichem Eigentum werden die Wärmenetze meist von kommunalen Genossenschaften betrieben. Aufgrund der Besonderheiten des dänischen Wärmemarkts (z. B. hohe Besteuerung fossiler Energieträger, staatlich regulierte Fernwärme-

preise) ist das dortige Geschäftsmodell nicht direkt auf Deutschland übertragbar. Doch auch in Deutschland werden derzeit einige solare Nahwärmesysteme geplant. Einen wichtigen Baustein für wirtschaftlich tragfähige Konzepte stellt die Förderung im Rahmen des Marktanreizprogramms (KfW-Programm Erneuerbare Energien, Programmteil Premium) dar, die sich auf einen Tilgungszuschuss in Höhe von bis zu 40 % der Nettoinvestitionskosten beläuft.

Unterstützung von Geschäftsmodellen

- **Wärmeatlanten**

Als Planungsgrundlage und damit als wichtige Ausgangsbasis für die Konzeption von Geschäftsmodellen im Wärmebereich können sogenannte Wärmeatlanten dienen. Diese stellen die räumliche Verteilung des spezifischen Wärmebedarfs bzw. der Wärmebedarfsdichte dar. Dies wurde z. B. im Rahmen des baden-württembergischen Energie-Atlas umgesetzt (vgl. *Abbildung 1*). Im Idealfall sind in einem solchen Atlas auch die vorhandenen Infrastrukturen (insb. Wärmenetze) verortet.

- **Abwärmatlanten**

Bei Prozessen in Industrie und Gewerbe sowie beim Betrieb von KWK-Anlagen fallen oft große Wärmemengen mit nutzbarem Temperaturniveau an. Während eine Verstromung mittels ORC-Turbinen bislang aufgrund der hohen Anforderungen an Temperaturniveau und Auslastung eher die Ausnahme darstellt, bietet die direkte thermische Nutzung der Abwärmeströme große Potenziale. Jedoch ist Außenstehenden i. d. R. nicht bekannt, wo nutzbare Abwärme mit welchen Parametern (Volumenstrom, Temperaturniveau, Leistung, zeitliche Verfügbarkeit) erschließbar ist. Diese Informationslücke kann mittels eines Abwärmeatlas geschlossen werden. Erfolgreich umgesetzt wurde ein Abwärmeatlas beispielsweise in Bayern (vgl. *Abbildung 2*).

Da die Abwärmepotenziale und deren Verortung nur unzureichend rechnerisch bestimmt werden können, spielt die Einbindung der Unternehmen eine große Rolle, um die freiwillige Eintragung der Wärmequellen mit den entsprechenden Parametern zu befördern. Auch auf Bundesebene sind Projekte zur überregionalen Erhebung von Abwärmepotenzialen gestartet [4].

- **Kommunale Wärmeplanung**

Noch weiter geht die kommunale Wärmeplanung, mit der die energetische Gebäudesanierung und effiziente Restwärmeversorgung systematisch analysiert werden. Dabei werden neben Strategien zur Gebäudesanierung und der Berücksichtigung von EE- und Abwärme-Potenzialen auch die vorhandenen Infrastrukturen (Gas- und Wärmenetze) sowie

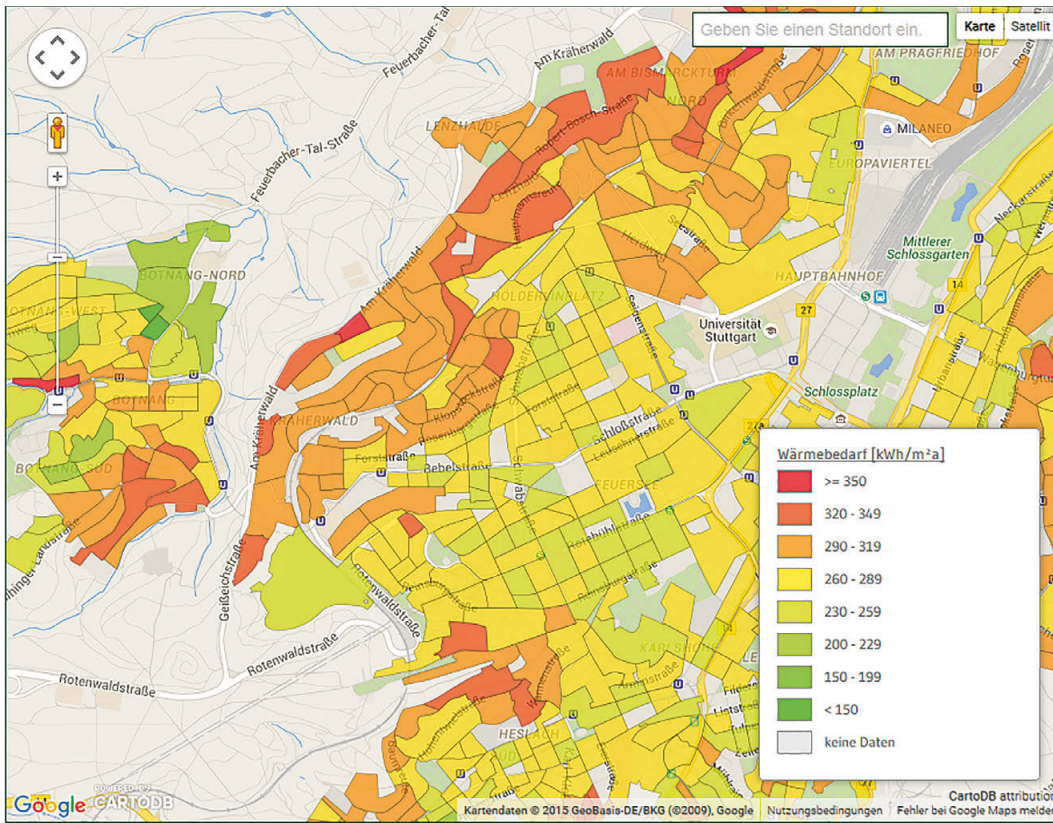


Abbildung 1
Wärmeatlas
Baden-Württemberg

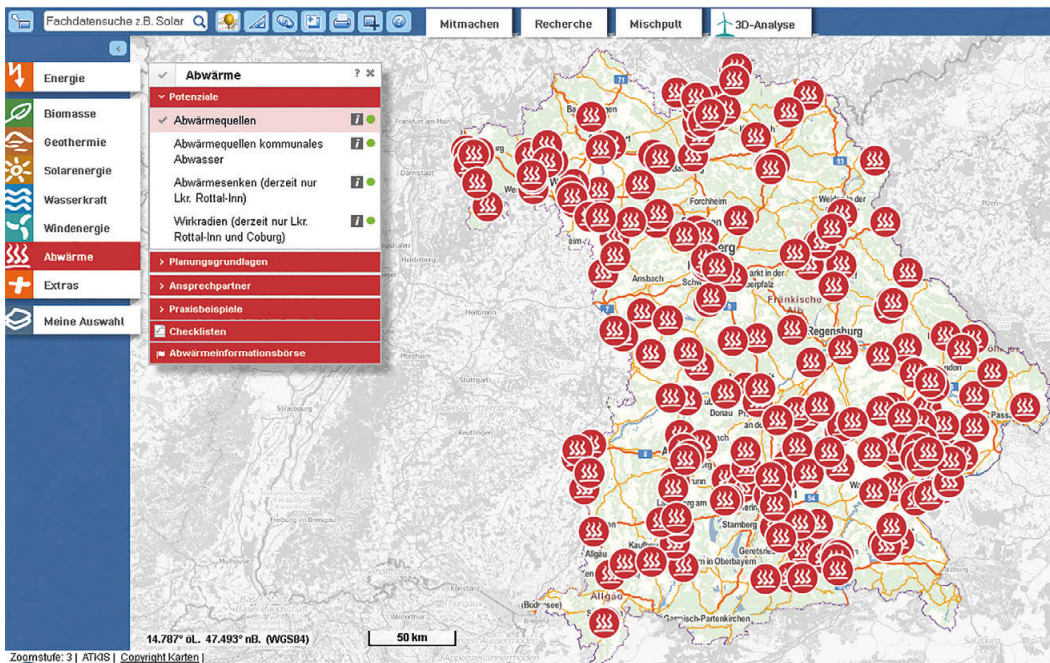


Abbildung 2
Abwärmeeatlas Bayern

die Belange der beteiligten Akteure berücksichtigt [5]. Damit schafft die kommunale Wärmeplanung die Voraussetzungen für eine zielgerichtete, energie- und kosteneffiziente Wärmeversorgung und kann damit einen wesentlichen Beitrag zur Schaffung von Investitionssicherheit und der Umsetzung von Geschäftsmodellen leisten.

Wirtschaftliche Bedeutung der Wärmewende

Die Investition in Anlagen zur Wärmebereitstellung und deren Betrieb, die energetische Sanierung von Gebäuden, die Herstellung von Vorleistungen sowie der Export von Vorleistungen und Anlagen schaffen

Abbildung 3
Bruttobeschäftigung:
Entwicklung im Bereich
„Erneuerbare Wärme“
in Deutschland [6]

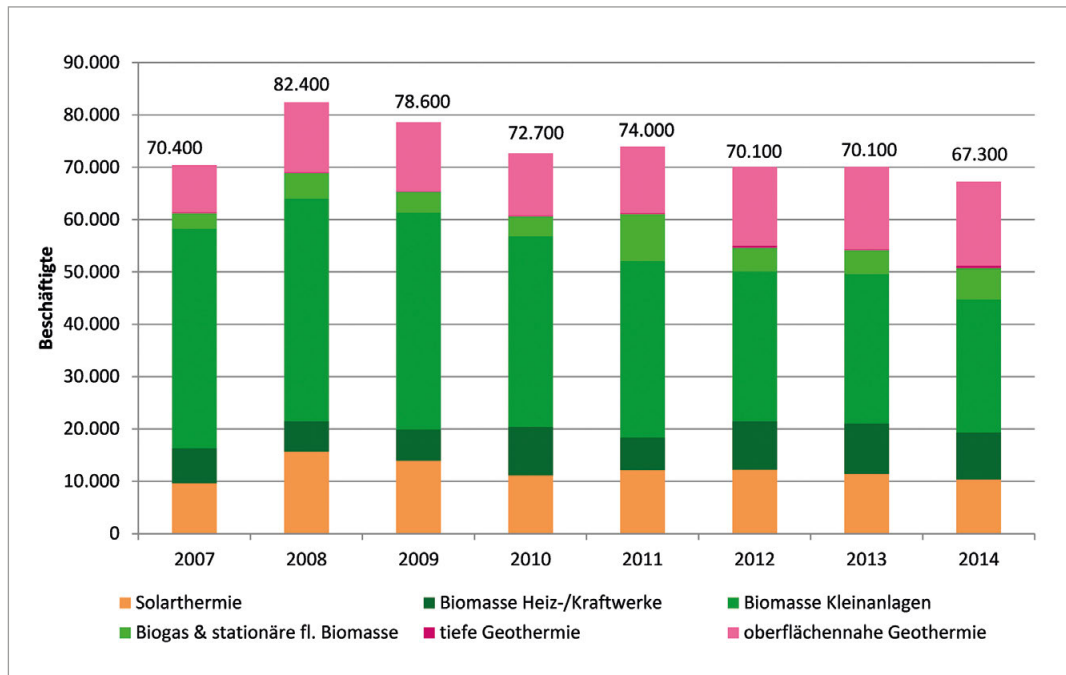
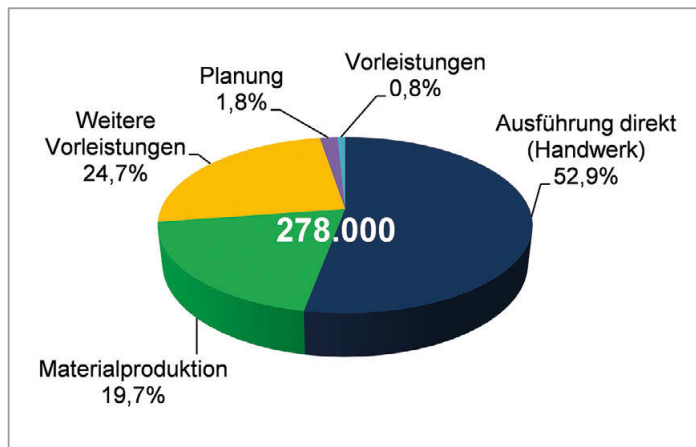


Abbildung 4
Beschäftigungseffekte
2011 durch energetische
Gebäudesanierung;
eigene Darstellung
nach [7]



positive Impulse für den heimischen Arbeitsmarkt. Im Bereich der Wärmebereitstellung aus erneuerbaren Energien beläuft sich die Beschäftigungsbasis auf eine Größenordnung von 70.000 bis 80.000 Beschäftigte (vgl. *Abbildung 3*). Ein Großteil entfällt dabei auf die Installation, den Betrieb und die Brennstoffversorgung von kleinen Biomasseanlagen. Ein relativ konstanter Sockel von rd. 10.000 Beschäftigten ist der Solarthermie zuzuordnen, während die Beschäftigungszahlen bei der oberflächennahen Geothermie (Wärmepumpen) in den vergangenen Jahren auf 15.000 Beschäftigte gewachsen sind.

Dem gegenüber stehen im Bereich der energetischen Gebäudesanierung (vgl. *Abbildung 4*) Wertschöpfungseffekte von 14 Milliarden Euro und Beschäftigungseffekte in Höhe von rd. 280.000 Vollarbeitsplätzen (Jahresbezug 2011). Im Vergleich zu den

Beschäftigungseffekten durch EE-Wärme zeigt dies einerseits die hohe Kapitalintensität der Gebäudesanierung, aber auch deren eingangs erwähnte Relevanz für die Wärmewende.

Mehr als die Hälfte der Beschäftigungseffekte durch energetische Gebäudesanierungen entfällt auf das Handwerk, das direkt mit der Ausführung der Maßnahmen beschäftigt ist. Rund ein Fünftel ist der Produktion der Dämmmaterialien, ein Viertel weiteren Vorleistungen zuzurechnen. Insgesamt entsteht ein Großteil der Beschäftigungseffekte im Bereich der Einfamilienhäuser, da diese einerseits den Großteil des Gebäudebestands in Deutschland ausmachen und andererseits die quadrometerbezogenen Kosten am höchsten sind.

Schlussfolgerungen

Neue Geschäftsmodelle im Wärmesektor entstehen derzeit hauptsächlich durch die zunehmende Kopplung und Interaktion von Strom- und Wärmesektor. Dabei ist die Flexibilität der Anlagen, sowohl bereitstellungsseitig als auch im Hinblick auf den Verbrauch von Strom im Wärmesektor, eine Grundvoraussetzung.

Die Komplexität und die vielfältigen Einflussfaktoren und Rahmenbedingungen stellen hohe Anforderungen, um wirtschaftlich tragfähige Geschäftsmodelle zu realisieren. Dabei entsteht auch der Bedarf für eine Beteiligung neuer Akteure und einer stärkeren Vernetzung der Beteiligten. Somit bietet die Wärmewende erhebliche Beschäftigungspotenziale, insbesondere im Bereich der energetischen Gebäudesanierung, aber auch durch den Ausbau der erneuerbaren Energien im Wärmemarkt.

Literatur

1. MINISTERIUM FÜR UMWELT, KLIMA UND ENERGIEWIRTSCHAFT BADEN-WÜRTTEMBERG. Contracting im Energiebereich. Erfolgsbeispiele aus Baden-Württemberg. [online]. 2015. [Zugriff am: 17. November 2015]. Verfügbar unter: https://um.baden-wuerttemberg.de/fileadmin/redaktion/m-um/intern/Dateien/Dokumente/2_Presse_und_Service/Publikationen/Energie/Contracting_im_Energiebereich.pdf
2. SCHEFTELOWITZ, Mattes, HENNING, Christiane und THRÄN, Daniela. Entwicklung der Förderung der Stromerzeugung aus Biomasse im Rahmen des EEG [online]. Deutsches Biomasseforschungszentrum gGmbH, 2014. Verfügbar unter: https://www.dbfz.de/fileadmin/user_upload/DBFZ_Reports/DBFZ_Report21.pdf
3. NIELSEN, Jan Erik. A Booming Market for Solar District Heating. Solar Heating and Cooling Conference 2014. Peking. Oktober 2014.
4. IZES GGMBH, DESTATIS, DIW BERLIN, IFD ALLENSBACH und FRAUNHOFER IPM. Abwärmeatlas – Erhebung, Abschätzung und Evaluierung von industrieller Abwärme in Deutschland – Potenziale und Forschungsbedarf. Gefördert vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. In Bearbeitung.
5. KELM, Tobias, VOGEL-SPERL, Antje, SCHMIDT, Maïke, CAPOTA, Michael, SPERBER, Evelyn, HUSENBETH, Christoph und NITSCH, Joachim. Studie Landeskonzept Kraft-Wärme-Kopplung Baden-Württemberg [online]. 2014. [Zugriff am: 9. Oktober 2015]. Verfügbar unter: http://www.zsw-bw.de/uploads/media/2014_Studie_KWK-Konzept_BW.pdf
6. O’SULLIVAN, Marlene, LEHR, Ulrike und EDLER, Dietmar. Bruttobeschäftigung durch erneuerbare Energien in Deutschland und verringerte fossile Brennstoffimporte durch erneuerbare Energien und Energieeffizienz [online]. September 2015. [Zugriff am: 1. Dezember 2015]. Verfügbar unter: <http://www.bmwi.de/BMWi/Redaktion/PDF/E/bruttobeschaeftigung-erneuerbare-energien-monitoring-report-2015,property=pdf,bereich=bmwi2012,sprache=de,rwb=true.pdf>
7. WEIß, Julika, PRAHL, Andreas, NEUMANN, Anna, SCHRÖDER, André, BETTGENHÄUSER, Kjell, HERMELINK, Andreas, VON MANTEUFFEL, Bernhard und JOHN, Ashok. Kommunale Wertschöpfungseffekte durch energetische Gebäudesanierung (KoWeG) [online]. Institut für Ökologische Wirtschaftsforschung, 2014. Verfügbar unter: https://www.klimaschutz.de/sites/default/files/article/141028%20Endbericht_KoWeG_final_0.pdf

Die Entwicklung der erneuerbaren Energien



Prof. Dr. Dr. Klaus
Töpfer
Exekutivdirektor a. D. des
Umweltprogramms der UN und
Gründungsdirektor des IASS

Sehr verehrte Damen und Herren,

ich freue mich, dass ich anlässlich dieses Jubiläums über die Entwicklung der erneuerbaren Energien sprechen darf und über deren Verankerung in der politischen Landschaft.

Erste gesetzliche Verankerung

Ich habe selbst noch die Freude gehabt, am ersten Stromeinspeisegesetz mitzuarbeiten. Maßgeblich daran beteiligt waren zwei Bundestagsabgeordnete, die dabei gar nicht an Erneuerbare in unserem Sinne dachten, sondern nur eine Einspeisemöglichkeit und eine vernünftige Vergütung für die Wasserkraftwerke an ihren Bächen haben wollten. Das war der Ausgangspunkt für dieses Gesetz und deshalb war es auch von bemerkenswerter Kargheit mit insgesamt nur fünf Paragraphen. Glückliche Zeiten! Allerdings war dieses Gesetz zunächst eher als eine erweiterte Agrarförderung denn als eine energiepolitisch relevante Größe gedacht.

Energiewende international denken

Wer über die Entwicklung der erneuerbaren Energien im politisch-gesellschaftlichen Bereich spricht, kommt an Hermann Scheer nicht vorbei, der Vieles möglich gemacht hat. Er hatte schon frühzeitig erkannt, dass wir Institutionen brauchen, die die erneuerbaren Energien auch über Deutschland hinaus voranbringen. Die IRENA (International Renewable Energy Agency) beispielsweise wäre ohne sein Engagement nicht denkbar gewesen.

Deutschland könnte eine Art Lackmustest für die globale Energiewende sein. Wir müssen zeigen, dass ein wirtschaftlich führendes, exportabhängiges Land in der Lage ist, die Energiewende zu erreichen. Und das mit einem Energieangebot, in dem immer weniger fossile Energien enthalten sind und die Kernenergie keine Rolle mehr spielt.

Doch wenn diese Entwicklung nur für sehr reiche Staaten erreichbar wäre, stünden wir vor einem erheblichen Problem. Die entscheidende Aufgabe ist: Wir müssen die Kosten für erneuerbare Energie so weit senken, dass sie auch international gegenüber den fossilen Kraftwerken wettbewerbsfähig werden.

In einem Sonderheft der Zeitschrift „The Economist“ heißt es, dass die Kernenergie in liberalisierten Energiemärkten keine Rolle spielen wird, weil sie einfach zu teuer ist.

Wer das nicht glaubt, sei an den Fall erinnert, den es momentan in Großbritannien zu besichtigen gibt. Bei einer Einspeisevergütung über 30 Jahre mit Inflationsgleitklausel, die jetzt bei 11,5 €ct liegt. Ich kann nur sagen: 11,5 €ct pro Kilowattstunde unterbieten wir jetzt schon locker. Daher bin ich der Überzeugung, dass sich der Erfolg der erneuerbaren Energien darin bestätigt, dass sie globalisierungsfähig geworden sind, und zwar deutlich schneller, als wir es erwartet hätten.

Globale Potenziale und Märkte

Was man in Deutschland nicht häufig genug sagen kann: Die Erneuerbaren sind eine globalisierungsfähige Technologie.

Um das zu bestätigen, braucht man sich nur die erneuerbaren Ressourcen in den verschiedenen Ländern anzusehen. In Deutschland haben wir im Durchschnitt etwa 900 Sonnenstunden im Jahr. Jenseits des Mittelmeeres kommen wir auf einen Wert von über 3000 Sonnenstunden im Jahr, da ist eine ganz andere Basis vorhanden. Und wenn man eine Konferenz der IRENA in Abu Dhabi besucht, bekommt man einen Eindruck davon, was in diesen Gegenden der Welt schon in Gang gekommen ist.

Es ist kein Zufall, dass andere Länder schon jetzt deutlich mehr in Erneuerbare investieren als in die traditionellen Energieträger. Wir können davon ausgehen, dass wir jetzt schon international den Bereich der Wettbewerbsfähigkeit erreicht haben.

In Indien wurde beschlossen, den Solarstrom von gegenwärtig 3 GW auf 100 GW zu steigern. Allerdings wird Indien dennoch, auf Grund seiner spezifischen Situation mit etwa 1,2 Milliarden Einwohnern, seine Kohleverstromung etwa vervierfachen, was wir uns sehr genau ansehen werden müssen.

In Kenia gibt es neben viel Sonne auch den Ostafrikanischen Grabenbruch, das Rift Valley, das eine hervorragende Möglichkeit bietet, Geothermie zu ernten. Mittlerweile hat Kenia drei kommerziell

betriebene Geothermie-Kraftwerke, die auch die Wärme nutzen und so die Blumenindustrie in Kenia unterstützen. Das wird sich auf anderen Gebieten ähnlich entwickeln.

Zukunftsmarkt Energiespeicher

Eine Studie der Agora Energiewende, deren Beirat ich vorstehe, hat untersucht, wie eine Energielandschaft aussehen würde mit Gewinnungskosten bei der Solarenergie von 5 bis 6 €/kWh (momentan liegen wir bei etwa 8 €/kWh) und etwa den gleichen Kosten bei der dezentralen Energiespeicherung.

Dieser Wert für die Energiespeicherung ist nicht aus der Luft gegriffen. Er wird aber interessanter Weise stark durch die Automobilindustrie getrieben werden. Der Skandal bei Volkswagen wird noch einer der größten Treiber für die Elektromobilität sein. Es wird keinen sauberen Diesel geben. Daher wird von den Herstellern erwartet, dass sie Automobile entwickeln, die mit Elektromobilität wirklich Zukunft haben, und die in anderen Teilen der Welt schon intensiv genutzt werden. Wir werden demnach auch Durchbrüche im Batteriebereich erreichen, als einem der wichtigsten Bestandteile der Elektromobilität, in dem wir in den letzten Jahren leider nicht wirklich intensiv vertreten waren.

In meiner Zeit als Umweltminister von Rheinland-Pfalz gab es ein Problem mit einem noch verbliebenen Batterie-Hersteller am Rhein, der massive Schwierigkeiten mit Blei hatte. Damals hatte ich nicht den Eindruck, dass die Herstellung von Batterien eine Zukunftsbranche für Deutschland sei. Das hat sich jetzt verändert.

Paradigmenwechsel im Energiemarkt

Wenn sich die Dinge so weiterentwickeln, werden wir eine Zeit erreichen, in der Energie nicht mehr Infrastruktur, sondern ein Wirtschaftsgut sein wird. Wir werden eine gänzlich andere Diskussion über die Frage haben, wer Erzeuger und wer Verbraucher ist.

Die Energiemärkte sind heute im sogenannten Merit-Order-Prinzip organisiert, sie werden also nach ihren jeweiligen Grenzkosten zugeschaltet. Wir wissen, dass die erneuerbaren Energien aber praktisch nur Kapitalkosten und keine Grenzkosten haben. Wenn man sie erst einmal installiert hat, stimmt der Satz: Die Sonne schickt keine Rechnung. Doch wie handelt man grenzkostenfreie Energien in einem noch grenzkostenorientierten Markt? Dieser Frage müssen wir uns sehr viel stärker widmen.

Demand-Side-Management

Dadurch, dass für Erneuerbare nur Kapitalkosten anfallen, könnten Flatrates angeboten werden, wie sie in der Telekommunikation selbstverständlich sind. Dabei werden sich schnell Fragen nach der Nachfrageseite der neuen Technologien stellen. Jeder sollte darüber nachdenken, wie flexibel er seine Nachfrage gestalten kann. Demand-Side-Management ist bis heute eine stiefmütterlich behandelte Größe. Immerhin gibt es eine Verordnung, die regelt, wie eine Rücknahme von Lasten finanziert wird. Das Anbieten abschaltbarer Lasten soll inzwischen ein gutes Geschäftsmodell geworden sein, mit dem schon einige Start-Ups agieren. Auch bei Großverbrauchern wird sich immer mehr die Frage stellen: Bringt es mir mehr ein, weiter zu produzieren, oder zu bestimmten Zeiten die Produktion zurückzufahren, um Flexibilität in der Nachfrage anbieten zu können? Sie dürfen davon ausgehen, dass beispielsweise die Aluminium-Industrie sehr genau über diese Frage nachdenkt.

Geopolitische Bedeutung der Erneuerbaren

Ich habe acht Jahre lang das Umweltprogramm der Vereinten Nationen mit Hauptsitz in Nairobi in Kenia geleitet. In Kenia hatten damals keine zehn Prozent der Menschen Zugang zu Elektrizität und es galt, massive Armutsprobleme zu beseitigen. Das jährliche Pro-Kopf-Einkommen liegt in vielen afrikanischen Ländern momentan bei ca. 800 bis 2000 Euro, wohingegen es bei uns bei etwa 40.000 Euro liegt.

Wenn man das sieht, kann man auf keine andere Idee kommen, als zu denken: Wenn sich das nicht ändert, ändert sich etwas. Solch ein wirtschaftliches Gefälle ist immer ein Mobilitäts-Anreiz. Wer glaubt, dass die gegenwärtigen Zuzüge der Kriegsflüchtlinge schon relevant seien, dem muss ich ganz klar sagen: Das ist nicht der Fall.

Deshalb brauchen wir dringend wirtschaftliche Entwicklung jeweils vor Ort. Erneuerbare Energien haben eine große Bedeutung mit Blick auf den Klimawandel, aber eben auch für die ökonomische Entwicklung in Regionen, in denen die Bevölkerung weiter ansteigt und Armut eine reale Bedrohung darstellt. Ich habe immer gesagt: Die CO₂-Emissionen der Industriestaaten sind eine ökologische Aggression. Sie sind eine Kampfansage an die Menschen in den ärmeren Ländern, die in ihrer Entwicklung behindert werden.

Als ich aus Kenia wiederkam, stellte ich mir folgende Frage: Können wir etwas tun, damit wir bei der nächsten Klimakonferenz nicht nur sagen, dass weniger CO₂ emittiert werden muss, sondern dass wettbewerbsreife Technologien vorhanden sind, die das ermöglichen? Ich bin sehr froh, dass dies möglich geworden ist.

Doch mir ist nicht bange, weil Sie darüber sicherlich schon nachdenken. Ich danke Ihnen herzlich und gratuliere dem Forschungsverbund Erneuerbare Energien!

Die Wissenschaft hat in Bezug auf die Erneuerbaren schon viel erreicht und deshalb kann man Ihnen mit großer Überzeugung gratulieren. Ich gebe gerne zu: So schnell hatte ich diese Entwicklung nicht erwartet. Die weltweite Anwendung der Erneuerbaren hebt die Entwicklung in eine neue Größenordnung. Insofern kann man die Umsetzung der Forschungsergebnisse z. B. in den USA, China und Indien, in die Kategorie der friedensstiftenden Maßnahmen einordnen.

Es ist großartig, dass die Wissenschaft das alles vorgebracht und sich für die Umsetzung stark gemacht hat. Damit hat sich etwas entwickelt, das eigentlich mehr als nicht mehr denkbar angesehen wurde: Dass Europa neue Technologien für einen Paradigmenwechsel entwickelt.

Weiterhin Forschungsbedarf

Wir dürfen bei den erneuerbaren Energien nicht den Fehler wiederholen, den wir damals bei der Kernenergie gemacht haben, als wir gesagt haben: Mit der Kernenergie ist das Ende der Energie-Knappheit erreicht und ein Menschheitstraum in Erfüllung gegangen. Das Ergebnis war, dass auf dem Gebiet der Energie kaum noch geforscht wurde.

Doch Wissenschaft ist nie eine abgeschlossene Angelegenheit, nie endgültig richtig und wahr. Vielmehr muss sie immer wieder auf den Prüfstand stellen, welche Dinge noch nicht so sind, wie sie sein sollten, wie wir weiter forschen müssen.

Das bringt mich zu einem Satz, der mir in Afrika immer gesagt wurde: Die beste Zeit, einen Baum zu pflanzen, war vor 20 Jahren. Die zweitbeste ist jetzt. Deswegen ist jetzt darüber nachzudenken, wie wir bei der Wärmewende weiterkommen und wie wir die Energiewende auch über die Stromerzeugungswende hinaus schaffen können. Deswegen ist jetzt darüber nachzudenken, wie eine Mobilitätswende machbar ist, die vermutlich tief in die Struktur der deutschen Wirtschaft einwirken wird und die deshalb mit besonderer Sorgfalt und vorbeugendem Handeln angegangen werden muss? Und deshalb ist jetzt darüber nachzudenken, was wir ergänzend dazu noch unternehmen können.

Gemeinsam Forschen für die Energie der Zukunft – Rückblick auf 25 Jahre ForschungsVerbund Erneuerbare Energien

Prof. Dr. Clemens Hoffmann: Der ForschungsVerbund wurde 1990 gegründet und begeht 2015 seinen 25. Geburtstag. Diesen Geburtstag wollen wir mit einer kleinen Rückblende feiern.

An der Gründung des Verbunds waren vier Institute beteiligt: Das Hahn-Meitner Institut, das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt, das Kernforschungszentrum Jülich und das Fraunhofer ISE.

Am Anfang war der ForschungsVerbund auf Solar-energie beschränkt. Im Laufe der Zeit kamen eine ganze Reihe weiterer Themen und Institute hinzu, beispielsweise 1995 das ISFH, im Jahr 2000 das GFZ, dann das Fraunhofer-Institut für Bauphysik 2007, dann das IZES und 2012 die Umweltthematik mit dem Wuppertal-Institut. Als vorläufig letzte Aufnahme kam in diesem Jahr das Deutsche Biomasseforschungszentrum in Leipzig hinzu.

In den Zeitraum seit der Gründung des FVEE fallen auch viele Forschungserfolge, die wir hier nicht alle im Detail vorstellen können

- Wechselrichter mit einem Wirkungsgrad von 99 %, BEMI (ISET/IWES)
- Wechselrichter mit einem Wirkungsgrad ebenfalls von 99 % (Fraunhofer ISE)
- Organische Solarzellen (ZAE)
- flexible Solarzellen (Fraunhofer ISE)
- Dünnschichtmaterialien für Solarzellen (ZSW, HZB, FZJ)
- Windanlagen neuer Dimension (Fraunhofer IWES)
- neue PV-Produktionstechnologien (ISFH, Fraunhofer ISE)
- Solarthermische Kraftwerke mit 57% Wirkungsgrad (DLR)
- Solare Brennstoffe (HZB)

Der ForschungsVerbund kann als Summe der Mitgliedsinstitute eine Menge Weltrekorde vorweisen, sie können hier beispielsweise sehen, wie die Prozentzahlen einzelner Halbleitersysteme über die Zeit gestiegen sind.

Monokristalline Solarzellen
2015 ISE 25,1 %

CIGS Dünnschicht-Solarzellen
2009 ZSW 19,6 %
2010 ZSW 20,4 %
2013 ZSW 20,8 %
2014 ZSW 21,7 %

Konzentrierte Mehrfachsolarzellen
2009 ISE 41,1 %
2013 ISE 44,7 %
2014 ISE 46,0 %

Kristalline Dünnschicht-Solarzellen
2011 ISFH 19,1 %

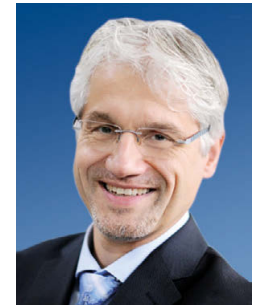
Siebdruck-Solarzellen
2011 ISFH 19,4 %
2012 ISFH 20,1 %
2014 ISFH 21,2 %

Hoffmann: Bei der Rückblende sollen uns drei Zeitzeugen helfen:

Dr. Gerd Stadermann war von 1999 bis 2012 Geschäftsführer des FVEE. Heute ist er Fellow am Institut für Ökologische Wirtschaftsforschung und beschäftigt sich nach wie vor intensiv mit Forschungs- und Energiepolitik. Aktuell arbeitet er an einem Buch zur Geschichte der Solarenergie.

Dr. Wolfhart Dürrschmidt, MinRat a.D., war von 1991 bis 2012 Mitarbeiter im Bundesumweltministerium und leitete dort viele Jahre das Grundsatzreferat für Erneuerbare Energien. Er hat mehrere wegweisende Gesetze für die erneuerbaren Energien mit auf den Weg gebracht. Dr. Dürrschmidt hat früh die Bedeutung der Forschung für den Umbau des Energiesystems erkannt und intensiv mit den Mitgliedsinstituten des FVEE zusammengearbeitet. U. a. entstanden unter seiner Leitung die EEG-Erfahrungsberichte und die BMU-Leitstudien. Seit 2014 ist Dr. Dürrschmidt ebenfalls Fellow am Institut für Ökologische Wirtschaftsforschung (IÖW) in Berlin.

Prof. Dr. Joachim Luther kann man als „Papst der Solarenergieforschung“ bezeichnen. Er leitete von 1993 bis 2006 das Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme in Freiburg, das heute das größte Solarforschungszentrum Europas ist. Er hat das ISE auch im Direktorium des FVEE vertreten und ist damit eines der langjährigsten Direktoriumsmitglieder des FVEE. Nach dem Ende seiner Tätigkeit als



Prof. Dr. Clemens Hoffmann
FVEE-Sprecher 2015
Institutsleiter Fraunhofer IWES
Kassel



Dr. Gerd Stadermann
Ehem. Geschäftsführer des FVEE
gerd.stadermann@ioew.de



Dr. Wolfhart Dürrschmidt
MinRat a.D., ehem. Referatsleiter
im Bundesumweltministerium



Prof. Dr. Joachim Luther
Ehem. Leiter des Fraunhofer ISE

Institutsleiter hat Prof. Luther das Solar Energy Research Institute of Singapore mit aufgebaut.

Hoffmann: Herr Dr. Stadermann: In welchen historischen und politischen Umgebungsbedingungen kam es zur Gründung des FVEE?

Stadermann: Die Gründung ging auf den damaligen Bundespräsidenten Richard von Weizsäcker zurück, der 1988 sagte, dass wir viel mehr Solarenergie-Forschung brauchen. Dies sagte er vor dem Hintergrund des Supergaus in Tschernobyl im April 1986. Drei Monate nach Tschernobyl wurde übrigens das Umweltministerium der Bundesrepublik gegründet. Ebenfalls wichtig war der Brundtland-Bericht von 1987. Er forderte eine nachhaltige Wirtschaftsweise, also auch eine nachhaltige Energieversorgung.

Der damalige Umweltminister Klaus Töpfer hat die Initiative des Bundespräsidenten aufgenommen und schlug die Bildung einer Großforschungseinrichtung vor. Die unmittelbare Idee aber, einen dezentralen Forschungsverbund Sonnenenergie zu gründen, kam vom damaligen Forschungsminister Heinz Riesenhuber.

Am 8. Oktober 1990 wurde dann in der Alten Oper in Frankfurt am Main der Forschungsverbund Sonnenenergie (FVS) gegründet. Auf der Gründungsveranstaltung sagte der erste FVS-Sprecher, Prof. Stiller, Geschäftsführer des HMI, es werde nun eine „dezentrale Großforschungseinrichtung“ gegründet. Doch Großforschungseinrichtungen wurden zu 90 % vom Bund grundfinanziert und 10 % vom jeweiligen Bundesland. Eine solche Finanzierung hätte der Solarenergieforschung einen ganz anderen Start ermöglicht. Stattdessen wurde der Forschungsverbund leider ohne Finanzierung gegründet. Es sollte lediglich eine Geschäftsstelle geben, die den Verbund organisieren und Forschungsprojekte koordinieren sollte. Die Forschungsvorhaben der Institute waren von der Projektförderung des BMBF abhängig und damit von der Haushaltslage des Bundes. Vom schmalen Budget der Mitgliedseinrichtungen musste auch der Mitgliedsbeitrag zur Finanzierung der Geschäftsstelle abgezweigt werden.

Hoffmann: Herr Dürrschmidt: Wie haben Sie die Gründungsphase des FVS erlebt und wie hat sich der Forschungsverbund aus Ihrer energiepolitischen Perspektive seit seiner Gründung entwickelt?

Dürrschmidt: 1990 war ein ganz entscheidendes Jahr: Der Abschlussbericht der Enquete-Kommission „Vorsorge zum Schutz der Erdatmosphäre“ des Bundestags wurde 1990 vorgelegt. Er wurde nach dreijähriger Arbeit einvernehmlich verabschiedet – trotz der Differenzen bei der Frage der Bewertung der Kernenergie. Die Bedrohung und Folgen der Klimaänderungen wurden bereits vor einem Vierteljahr-

hundert von Wissenschaft und Politik als dramatisch eingestuft. Es war klar geworden, dass unverzügliches und tiefgreifendes Handeln zwingend erforderlich war.

Der Bundestag hatte 1988 ein umfangreiches Studienprogramm zum Thema „Energie und Klima“ vergeben und ausgewertet. Im Wissenschaftlichen Dienst des Bundestags angestellt, hatte ich die Freude, dieses Forschungsprogramm zu betreuen; rund 50 Institute waren beteiligt. Als Ergebnis wurde deutlich, dass der konsequente Ausbau der Nutzung erneuerbarer Energien eine zentrale Rolle spielen kann und muss. Wissenschaft und Politik haben dabei hervorragend zusammengearbeitet; die Studien wurden in 10 dicken Bänden veröffentlicht. Der Abschlussbericht wurde deutsch und englisch publiziert und konnte so maßgeblich zur Klimaschutzpolitik in Deutschland, der EU und global beitragen. Die dabei erforderliche Zusammenarbeit hat den Zusammenschluss einschlägiger Institute zum FVS befördert.

Die Institute haben 1990 mit der Gründung des FVS eine Bündelung der Kompetenzen im Bereich der erneuerbaren Energien bewirkt. Damit konnten sie ihre Schlagkraft deutlich erhöhen, denn im etablierten Wissenschaftsbetrieb wurden die Erneuerbaren damals noch als unwichtig und kaum würdig für FuE-Themen eingestuft. Der FVS war die richtige Antwort, so dass die FuE-Arbeiten in diesem Bereich einen immer größeren Stellenwert erringen konnten. 1990 wurde die Klimaschutzpolitik im Bundesumweltministerium verankert unter Minister Klaus Töpfer. Klimaschutz und der Ausbau der erneuerbaren Energien wurden so nicht von der Energiepolitik vorangetrieben, sondern von der Umwelt- und Klimaschutzpolitik, kreativen Wissenschaftlern, innovativen Unternehmen und zivilgesellschaftlichem Engagement.

Hoffmann: Herr Prof. Luther: worin sehen Sie im Rückblick den Sinn und Zweck eines solchen Forschungsverbundes?

Luther: Der Forschungsverbund war von Herrn Prof. Töpfer, der damals gewissermaßen der Promoter des Vorhabens war, als Großforschungseinrichtung gedacht. Es ist aber nie eine Großforschungseinrichtung geworden, nicht einmal annähernd. Die Aufgaben des Forschungsverbundes, wie ich sie sehe, waren:

1. Die Außendarstellung dessen, was man im Bereich der erneuerbaren Energien auf der Basis wohldefinierter, wohlüberlegter wissenschaftlicher Erkenntnisse machen kann.
2. Die Politikberatung und das Vertreten der Forschung nach außen.

Außerdem kann der FVEE Absprachen und Koordinierungen innerhalb des Verbundes leisten. Das

hat vor allem im Bereich der Photovoltaikforschung hervorragend funktioniert. Verschiedene Technologien standen damals in Konkurrenz zueinander und 1990 konnte man noch nicht absehen, welche das Rennen machen würde. Wir haben damals versucht, eine Schwerpunktsetzung der einzelnen Institute vorzunehmen. So haben wir immer zwei Institute einem Thema zugeordnet, damit Konkurrenz da ist, aber nicht alle alles machen. Das ISFH und das ISE haben sich entschieden, Wafer-Silizium zu erforschen, das ZSW und das HMI haben sich um das CIS gekümmert. Ein anderes Beispiel sind die III-V-Solarzellen, die hauptsächlich für die Anwendung im Weltraum konzipiert sind, die das ISE zusammen mit dem HMI übernommen hat. Diese Absprache hat funktioniert und auch über sehr lange Zeit gehalten. Ansonsten sind wir aber freundliche Konkurrenten.

Das ist auch gerade der Wert des Forschungsverbundes, dass wir unsere Methoden und Zielsetzungen nach außen tragen und soweit wie möglich intern abstimmen. Diese Abstimmungen sind aber nicht immer möglich, weil die Finanzierungsmodelle für Länder-Institute, Fraunhofer-Institute und Helmholtz-Institute völlig verschieden sind. Wenn man sich aber diesen klaren Wein einschenkt, dann kann man ein hervorragendes Forschungsnetzwerk realisieren und schafft eine so tolle und Wachstums- und Erfolgsgeschichte.

Hoffmann: Herr Stadermann, was war die ursprüngliche Zielsetzung des FVS und wie haben sich die Ziele des Verbunds im Laufe der Jahre verändert bzw. erweitert?

Stadermann: Ich würde mehrere Ziele unterscheiden:

1. Die Institute sollten arbeitsteilig vorgehen und ihre Forschungspotenziale bündeln.
2. Sie sollten aber auch im Wettbewerb stehen. Ein Beispiel dafür ist der Wettbewerb um den besten Wechselrichter zwischen Fraunhofer ISE und dem Institut für Energieversorgungstechnik (ISET) in Kassel. Dadurch wurde in Deutschland der beste Wechselrichter der Welt entwickelt.
3. Durch den Forschungsverbund sollte ein gemeinsamer Ansprechpartner für Politik, Öffentlichkeit und Wirtschaft geschaffen werden.
4. Die Forschung und Entwicklung sollte beschleunigt werden. Dafür braucht man Geld – mehr Geld! Und dafür hatten die Institute ein wichtiges Argument entwickelt, das heute noch gilt: Nämlich dass die Entwicklungskosten der erneuerbarer Energien als Teil der externen Kosten der erschöpflichen fossilen und nuklearen Energieträger anzusehen sind.
5. Das vielleicht wichtigste Ziel ist globaler und sehr weitsichtiger Natur. In einem Memorandum des FVS im Jahr 1992 an die Politik heißt es vorausschauend und auch heute noch hoch aktuell:
„Es werden Lösungsbeiträge zu zwei globalen Problemkreisen benötigt:
 - *globale Umwelt- und Klimaverträglichkeit der Energietechniken*
 - *ausreichende Energieversorgung für eine wachsende Erdbevölkerung*

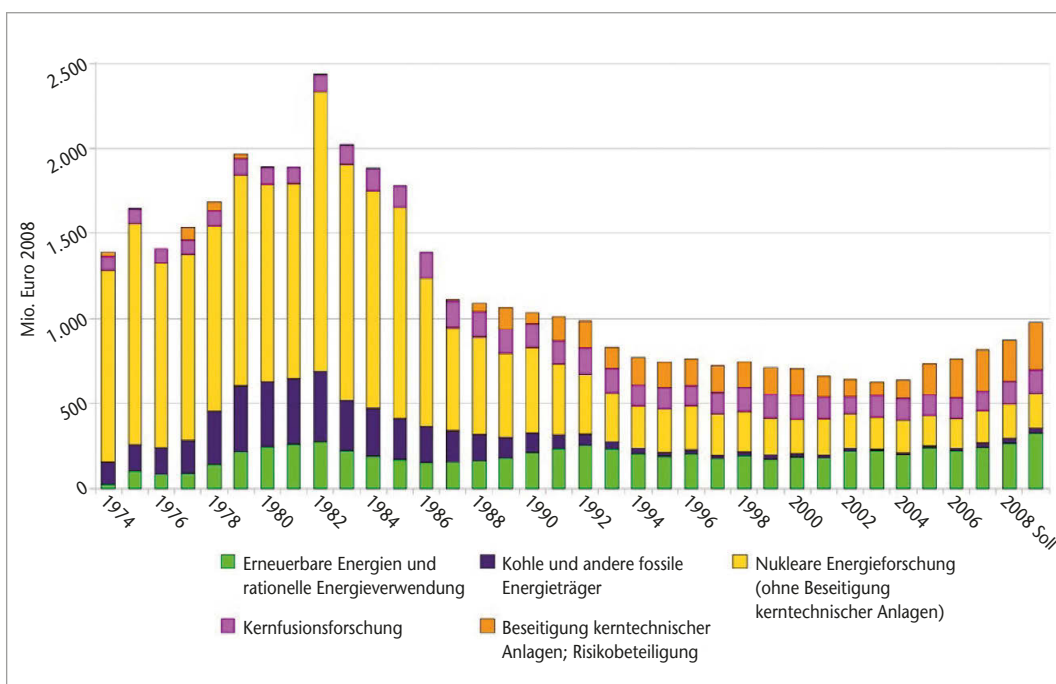


Abbildung 1
Energieforschungsmittel des Bundes seit 1974

Beide sind Voraussetzung für Wohlstand und Stabilität der Welt, in der wachsende Bedürfnisse vor allem in den weniger entwickelten Regionen befriedigt werden müssen, wenn nicht Völkerwanderungen unseren inneren und äußeren Frieden gefährden sollen.“

Und dieses Memorandum ist jetzt 23 Jahre alt!

Hoffmann: Die Forschungsthemen im FVEE haben sich in der 25jährigen Geschichte des Verbunds stark erweitert. Herr Stadermann, welche Rolle spielte in diesem Zusammenhang die Umbenennung des Forschungsverbunds Sonnenenergie (FVS) in den Forschungsverbund Erneuerbare Energien (FVEE) im Jahr 2009?

Stadermann: Die Forschungsthemen und Mitgliedsinstitute des Forschungsverbundes haben sich mit den wachsenden Aufgaben bei der Transformation des Energiesystems weiterentwickelt. Die Umbenennung sollte nach außen größere Transparenz über die gewachsene Palette der wissenschaftlichen Kompetenzen schaffen. Denn neben Photovoltaik, Solarthermie und solarem Bauen – die klassischer Weise als „Sonnenenergie“ gesehen werden – forschen die Mitgliedsinstitute auch für Windkraft, Geothermie und Biomasse. Darüber hinaus will der Forschungsverbund die gesamte Komplexität einer nachhaltigen Energieversorgung erfassen, um Wirkungszusammenhänge zu erkennen und zukunftsfähige Lösungen zu entwickeln. Hierzu gehören die Aktivitäten in den übergreifenden Bereichen Systemanalyse, Netzmanagement, Energiespeicherung und Energieeffizienz. Der neue Name „Forschungsverbund Erneuerbare Energien“ sollte zeigen, dass der Verbund für die gesamte Palette dieser Forschungsthemen einer der zentralen Ansprechpartner ist.

Hoffmann: Herr Dürrschmidt: Sie haben intensiv an gesetzlichen Regularien mitgewirkt, die die Energiewende entscheidend beschleunigt haben. Dazu zählen u. a. das Stromeinspeisungsgesetz, die Verankerung der erneuerbaren Energien im Baugesetzbuch und nicht zuletzt das EEG. Welchen Beitrag hatten die Institute des Forschungsverbunds für die Entstehung dieser wegweisenden energiepolitischen Rahmenbedingungen? Wie schätzen Sie den Beitrag des FVEE zur Energiewende ein?

Dürrschmidt: Die FVS- und später FVEE-Institute haben großen Anteil an der Entwicklung von Maßnahmen und Rahmenbedingungen zur Energiewende, zum Klimaschutz und insbesondere zum Ausbau der erneuerbaren Energien. Einige Beispiele: Das Stromeinspeisungsgesetz (StrEG) resultierte aus dem Studienprogramm für die Enquete-Kommission,

so dass Abgeordnete im Bundestag die gesetzliche Antwort für den Strombereich unmittelbar umsetzen konnten.

Auch zur Erarbeitung des am 1.4.2000 in Kraft getretenen Erneuerbare-Energien-Gesetzes (EEG) konnten FVEE-Institute wesentlich beitragen. Das StrEG war in den 90er Jahren zwei Mal novelliert worden. Das BMWi war zwar formal zuständig, aber ablehnend eingestellt, während sich das BMU intensiv für die Novellen und Ende der 90er Jahre für das Nachfolgegesetz, das EEG, eingesetzt hat. Die von BMU und UBA in Auftrag gegebene Studie „Klimaschutz durch Nutzung Erneuerbarer Energien“ wurde 1998 und 1999 erarbeitet. Die Gesamtfederführung hatte das DLR mit Joachim Nitsch und Mitarbeitenden, das Wuppertal-Team leitete Manfred Fishedick, das ZSW-Team Frithjof Staß. Mit dieser Studie hatte das BMU eine hervorragende Basis, um fachlich fundierten Input in die Erarbeitung des EEG zu geben. Da das eigentlich federführende BMWi keine Initiative zeigte, ist auch das EEG in der Mitte des Bundestags entstanden – mit Unterstützung des BMU und der FVEE-Institute.

Ein weiteres Beispiel sind die Langfristszenarien und Strategien für den EE-Ausbau von DLR/IWES/IfnE im Auftrag des BMU; wegen ihrer großen Bedeutung „BMU-Leitstudien“ genannt. An ihnen haben sich Wissenschaft, Politik und Wirtschaft maßgeblich orientiert. Die Arbeiten aller FVEE-Institute sind hier eingeflossen. Mit dem kräftigen Wachstum der Erneuerbaren wurden die Voraussetzungen geschaffen für die Beschlüsse zur Energiewende.

Hoffmann: Herr Prof. Luther: Der FVEE hat als Solarverbund gestartet und man kann sagen, dass wir gerade dabei sind, diese junge Industrie in Deutschland massiv zu gefährden. Wenn man die deutsche Industriepolitik betrachtet, entdeckt man, dass das ebenso für die Themen Mikroprozessoren und LCD- und LED-Bildschirme gilt, deren Produktion inzwischen hauptsächlich in Asien vor sich geht. Weil Sie, Herr Luther, lange in Asien waren, möchte ich ihnen die vielleicht etwas überspitzte Frage stellen: Hat Deutschland ein Problem mit Halbleitern?

Luther: Ich würde schon einen Unterschied machen wollen zwischen einem Mikroprozessor und einer Solarzelle. Es geht hier ja um die Energieversorgung der Zukunft, die gesichert werden muss. Herr Prof. Töpfer hat zu Recht gesagt, dass die Energie von oben kommt und nichts kostet. Wir brauchen aber auch Energiekonverter, um hier in Europa eine sichere und zuverlässige Energieversorgung zu realisieren, ohne von anderen abhängig zu sein. Deshalb sind ein Flachbildschirm und ein flat-panel-solar-module für die Sicherheit der Energieversorgung zwei völlig verschiedene Dinge. Ich denke, dass die

Politik hier in den letzten Jahren veritable Fehler gemacht hat, dass die Industrie bis auf ein oder zwei bedeutende Unternehmen in Europa kaputtgegangen ist. Das merken natürlich auch die Forschungsinstitute. Ich halte es für einen großen Fehler, denke aber auch, dass wir das dadurch kompensieren können, dass wir uns darauf besinnen, was die Institute aber auch die Universitäten an neuen, innovativen Ideen haben, die man in die Praxis umsetzen könnte, wenn man denn genügend Geld in die Hand nehmen würde. Die Chinesen haben praktisch beliebig viel Geld zur Verfügung. Wenn Sie aber hier eine Milliarde brauchen, wird es schwierig. Anders gesagt: In Deutschland und Europa fehlt es an einer Industriepolitik. Das halte ich persönlich für eine Katastrophe, wenn wir eine nachhaltige Energieversorgung realisieren wollen.

Hoffmann: Herr Dürrschmidt: Gab es aus Ihrer Sicht auch mal Ärger mit den Instituten?

Dürrschmidt: Es gab durchaus Ärger, aber nicht mit den FVEE-Instituten, sondern mit den Ergebnissen ihrer Arbeiten, die manchmal politisch nicht genehm waren. Zum einen schlug die Politik beim Ausstieg aus der Kernenergie Haken: Zunächst wurde der Ausstieg beschlossen, dann eine Laufzeitverlängerung, nach der Havarie in Fukushima dann wieder der fast identische vorhergehende Ausstiegspfad, nun „Energiewende“ genannt. Wenn die Leitstudie darlegte, wie die Klimaziele auch bei einem Kernenergie-Ausstieg erreicht werden können, so kam eine Laufzeitverlängerung in argumentative Schwierigkeiten. Analoges gilt für die Verbrennung fossiler Energieträger und insbesondere von Kohle. Wenn von der Bundesregierung beschlossene Klimaziele erreicht werden sollen, dann muss der Einsatz von fossilen Energieträgern kontinuierlich sinken; schlüssige Energiepfade wurden ermittelt. Solche wissenschaftlichen Ergebnisse lassen Politikern aber weniger Spielraum. Als zuständiger Referatsleiter, der es sich zur Aufgabe gemacht hat, wissenschaftliche Erkenntnisse in den Politikbetrieb zu transportieren, muss man dann manchmal ganz schön viel aushalten.

Effiziente Wärme- und Kälteversorgung für Gewerbe, Handel und Dienstleistung



Fraunhofer ISE
Dr. Doreen Kalz
doreen.kalz@ise.fraunhofer.de

Dr. Wolfgang Kramer
wolfgang.kramer@ise.fraunhofer.de

Dr. Anton Neuhäuser
anton.neuhaeuser@ise.fraunhofer.de

DBFZ
Sven Schmidt
sven.schmidt@dbfz.de

Der Sektor Gewerbe, Handel und Dienstleistungen (GHD) mit seinem hohen Anteil an Büro- und Produktionsflächen beansprucht rund 16 % (1.354 PJ) des gesamten Endenergieverbrauchs in Deutschland [1, Stand 2013]. Fast die Hälfte des Energieeinsatzes entfällt auf die Raumwärme und ein Viertel der Energie wird für mechanische Energie, d. h. in erster Linie für Antriebe, verwendet (*Abbildung 1*). Prozesswärme, Warmwasser und Beleuchtung bilden die restlichen Energieverbrauchsanteile. Für die Klimatisierung des gesamten GHD-Sektors werden nach unterschiedlichen Erhebungen Werte für den jährlichen Endenergiebedarf zwischen 15,0 TW_{end} [2, Stand 2005] und 20,8 TW_{end} [3, Stand 2009] angegeben. Viele Studien prognostizieren weiterhin einen Anstieg des Energiebedarfs für die Gebäudekühlung in Deutschland und auch in Europa. Damit ist der gesamte Bestand an Nichtwohngebäuden in den Nutzungsklassen „Bildung“, „Büro und Verwaltung“, „Gewerbe und Industrie“ und „Handel und Dienstleistung“ für CO₂-Emissionen in Höhe von ca. 155 Mio. t pro Jahr verantwortlich [4].

Zielstellung

Bestehende Studien zum GHD-Sektor gehen davon aus, dass Energieeinsparungen in signifikanter Höhe durch Effizienzsteigerungen bei der Beheizung und Kühlung von Nichtwohngebäuden des GHD-Sektors

erschließbar sind. Durch eine konsequente Bedarfsreduktion und durch eine energieeffiziente Wärme- und Kältebereitstellung wird erwartet, dass sich kumulierte wirtschaftliche Energieeinsparpotenziale in einer Größenordnung von 14 % des gesamten Endenergiebedarfs der Sektoren Industrie und GHD erschließen lassen [5]. Absolut gesehen liegen die größten Potenziale im Bereich der Gebäudetechnik [5]. Beispiele für eine Systemoptimierung und für Maßnahmen zur Steigerung der Effizienz entlang der gesamten Versorgungskette sind in *Abbildung 2* dargestellt.

Dazu werden im Folgenden ausgewählte Projekte und Ergebnisse vorgestellt:

Effiziente Wärme- und Kälteversorgung von Gebäuden mit Wärmepumpen

Gebäude des GHD-Sektors mit einem reduzierten Leistungs- und Energiebedarf für Heizung und Kühlung ermöglichen den effizienten Einsatz von Umweltwärmequellen und -senken in Kombination mit Wärmepumpen. Flächenheizsysteme, wie Fußboden- oder Betonkerntemperierung, begünstigen den Einsatz von Wärmepumpen, mit denen das vorhandene Temperaturniveau der Wärmequelle auf die notwendige Vorlauftemperatur von 27 bis 32 °C erhöht wird. Im Sommer werden das Erdreich oder das Grundwasser vorrangig direkt als Wärme-

Abbildung 1
Energieverbrauch [PJ] im GHD-Sektor:
Anteile des jeweiligen Anwendungsbereichs [%] am Gesamtbezug
Quelle: [1], Stand Februar 2013

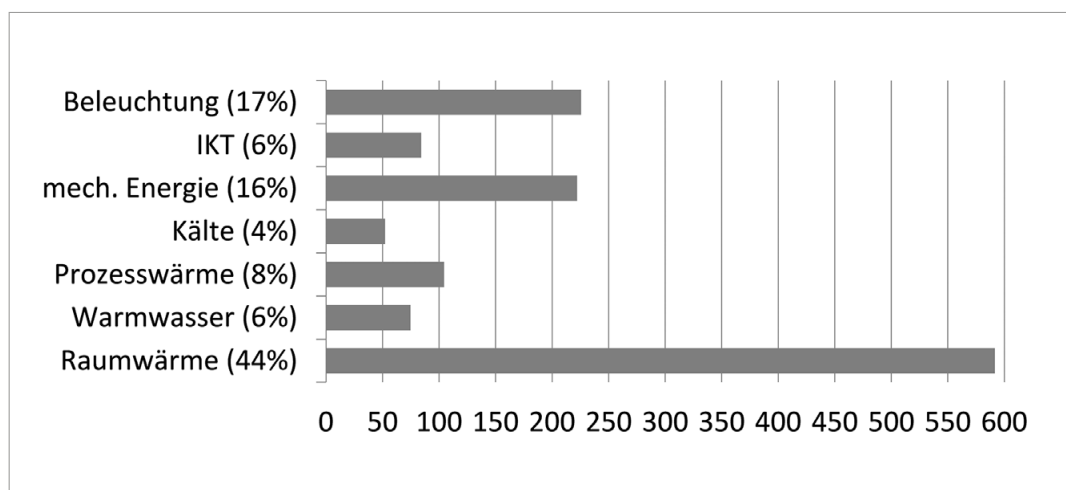
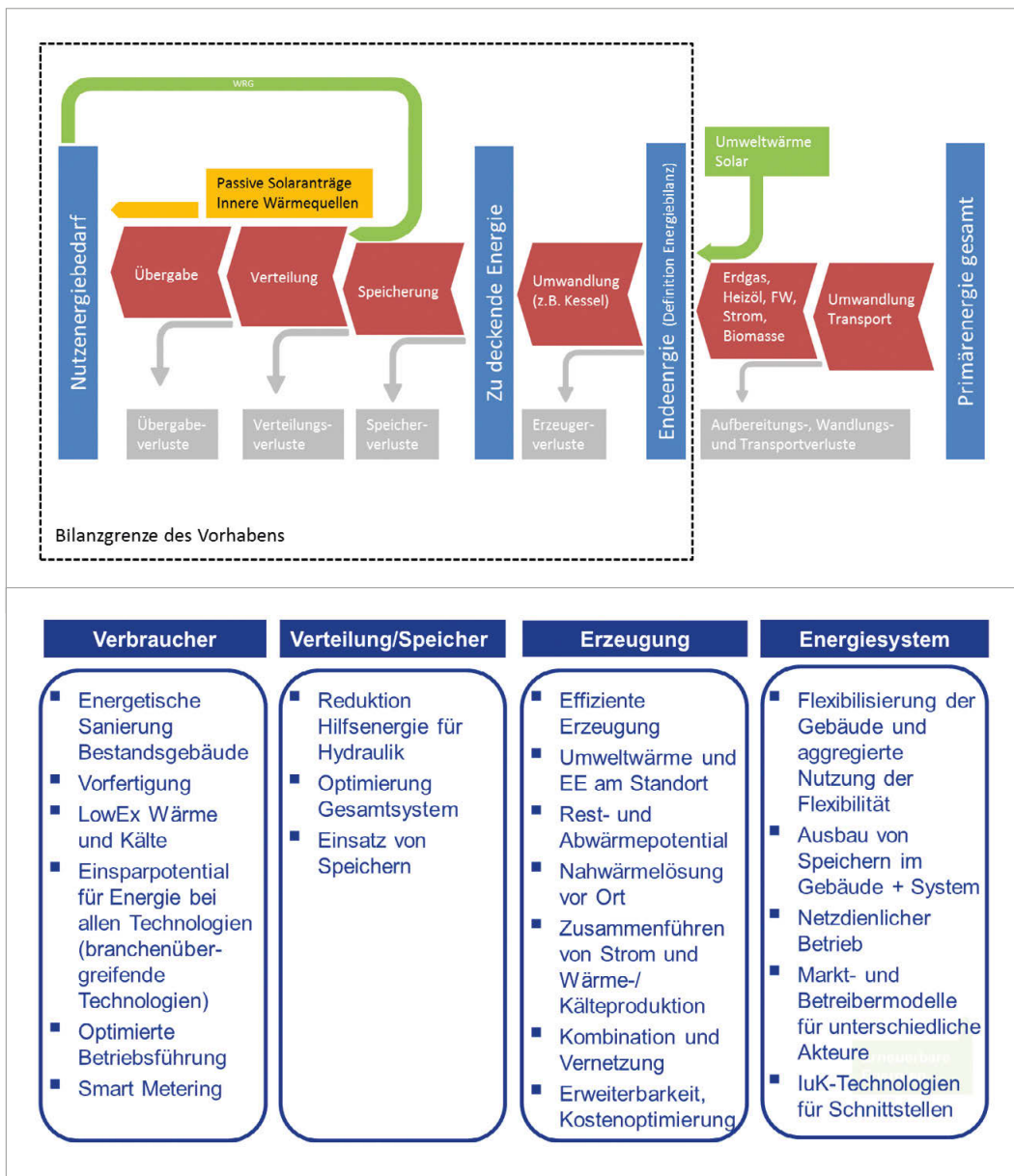


Abbildung 2
Effizienzsteigerung und Systemoptimierung entlang der gesamten Versorgungskette



senke zur Kühlung der Gebäude genutzt. Erfordert das Gebäude und die Nutzung eine erhöhte Kühlleistung, kann Klimakälte auch durch eine reversibel arbeitende Wärmepumpe energieeffizient bereitgestellt werden. Reicht eine Quellenart nicht aus, dann können mehrere Quellen parallel zu einem Verbund betrieben werden.

Auf Basis von mehrjährigen Messkampagnen im Rahmen des Förderprogramms EnOB (Projekte „LowEx-Monitor“ und „Netzreaktive Gebäude“, Förderkennzahlen 0327466B und 03ET1111A) wurde die Energie- und Effizienzperformance sowie das Betriebsverhalten von 17 großen Wärmepumpenanlagen mit einem thermischen Leistungsbereich von

40 bis 300 kW_{therm} bewertet. Für die Wärmepumpenanlagen (Wärmepumpe mit Verdichter und Primärpumpe) wurden Jahresarbeitszahlen von 3,2 bis 6,7 kWh_{therm}/kWh_{el} (Erdreich) bzw. 3,0 kWh_{therm}/kWh_{el} (Grundwasser) erreicht. Die Nutzung von erdreichgekoppelten, reversiblen Wärmepumpen zur Kälteerzeugung stellt ein effizientes und nachhaltiges Konzept zur Gebäudekühlung dar. Auch hier bedingen die relativ hohen Vorlauftemperaturen zur Kühlung von 16 bis 20 °C gute Energieeffizienzen. Messtechnisch wurden in Projekten Jahresarbeitszahlen von 4,8 bis 6,1 kWh_{therm}/kWh_{el} nachgewiesen. Betriebserfahrungen und die systematische wissenschaftliche Auswertung der Projekten zeigt, wie wichtig die richtige Auslegung des Gesamtsystems, eine korrekte

Umsetzung auf der Baustelle und schließlich eine gut abgestimmte Betriebsführung sind, um das hohe Effizienzpotenzial von Energieversorgungskonzepten mit Umweltenergie wirklich auszuschöpfen.

Wichtige Maßnahmen sind unter anderem:

- eine an das Gebäude und die Nutzung angepasste Heiz- und Kühlkurve
- niedrige Vorlauftemperaturen für die Wärmeübertragungssysteme
- Regelung der Volumenströme nach der Temperaturdifferenz
- Anpassung bzw. Optimierung der Betriebszeiten
- Reduzierung des Teillastverhaltens
- Leistungsabstimmung der einzelnen Verbraucher
- geringe Druckverluste im hydraulischen System

Effiziente Wärmeerzeugung mit Solarthermie für Prozesse

Thermische Solaranlagen können in vielen Industrie- und Gewerbebetrieben einen erheblichen Teil des Wärmebedarfs decken. Zur Planung nachhaltiger Anlagen ist branchenspezifisches Know-how entscheidend, weil mögliche Effizienzmaßnahmen und Zukunftsszenarien individuell berücksichtigt werden müssen. Das Fraunhofer ISE arbeitet aktuell an einem Branchenkonzept für die Nutzung solarer Prozesswärme in Wäschereien. Es koordiniert ein Konsortium aus Solarthermie-Industrie, Wäschereibranche, Forschung und Softwareentwicklung. Ziel ist es, Lösungen für eine optimierte und standardisierte solarthermische Unterstützung zu erarbeiten. („Solare Prozesswärme für Wäschereien“, SoProW, Förderung BMUB, Förderkennzahl: 0325999A).

Unter anderem werden folgende Effizienzmaßnahmen geprüft:

- Dampferzeuger: Regelungsoptimierung, Economiser, Vorwärmung Kessel-Zusatzwasser über Rauchgaskondensator (Brennwerttechnik) und/oder Brüden-Kondensator
- Dampfnetz: Isolierung von Rohrleitungen, Prüfung der Kondensat-Ableiter, geschlossene Kondensat-Rückführung (unter Druck), Nachverdampfung zur Erzeugung von Niederdruck-Dampf
- Taktwaschanlage: Vorwärmung Waschwasser durch Abwasser und Mangel-Abluft, Reduzierung der Bearbeitungstemperatur
- Wasch-Schleudermaschinen: Vorwärmung Waschwasser durch Abwasser, Reduzierung der Bearbeitungstemperatur
- Trockner: Dezentrale Beheizung und Gegenstrom-Wärmetauscher zur Vorwärmung der Trocknungsluft mit der Abluft

Nach Umsetzung dieser Effizienzmaßnahmen erscheinen folgende Integrationsstellen für Solarwärme besonders interessant:

- Waschwasser für Wasch-Schleudermaschinen (ca. 25 auf ca. 70 °C)
- Waschwasser für Taktwaschanlage (ca. 40 auf ca. 60 °C)
- Kessel-Zusatzwasser (ca. 70 auf ca. 100 °C)
- Direkte solare Dampferzeugung (Dampftemperaturen zwischen 140 und 200 °C)

Auf Prozessebene wird bei den Wasch-Schleudermaschinen aufgrund ihres Batch-Betriebes oft nur die Abwasser-Wärmerückgewinnung umgesetzt, so dass ein sehr attraktives Temperaturniveau verbleibt. Bei der Taktwaschanlage kann meist in erheblichem Umfang Abwärme genutzt werden. Aufgrund des hohen Wasser- und Energiebedarfs kann aber trotzdem eine geeignete, kontinuierliche Solar-Wärmenenke verbleiben. Auf Versorgungsebene verbleibt in sehr effizienten Betrieben beim Kessel-Zusatzwasser teils nur noch ein relativ geringer Wärmebedarf auf für stationäre Kollektoren vergleichsweise hohem Temperaturniveau. Je nach Standort ist dort die Dampferzeugung mit fokussierenden, nachgeführten Kollektoren zu prüfen. Wenn das Dampfnetz generell nicht zur Disposition steht, bietet diese Einbindungsart die höchste Zukunftssicherheit, weil sich Änderungen an einzelnen Prozessen kaum auf den Solarertrag auswirken.

Effiziente Wärmeerzeugung mit Biomasse

Der Einsatz von Biomasse zur effizienten Wärmebereitstellung konnte sich in den letzten Jahren auch im GHD-Sektor erfolgreich etablieren. Die vielfältigen Vorteile wie hohe Flexibilität, gute Speicherbarkeit und dezentrale Anwendung machen die Biomasse zum idealen Partner im erneuerbaren Energiemix der Zukunft und können zu einem klimafreundlichen Wärmemarkt beitragen. Forschungen im Bereich zukunftsweisender, effizienter, kostengünstiger und praxisorientierter Technologien stehen hierbei im Vordergrund. Aktuell wird ein Großteil der erneuerbaren Wärme mit Holzfeuerungen kleiner und mittlerer Leistung gewonnen. Hierbei kommen vor allem Technologien wie Scheitholzvergaserkessel, Holzhackschnitzel- und Pelletkessel zum Einsatz.

Um die Technologie von Konversionsanlagen und deren Zusammenhänge zu optimieren, befasst sich das Deutsche Biomasseforschungszentrum (DBFZ), insbesondere der Bereich der thermo-chemischen Konversion mit der Anlagentechnologie und dessen Regelungsalgorithmen, der Modifikation von Fest-

brennstoffen sowie der Rauchgasreinigung und der Systemeinbindung. Beispielsweise wurden im Rahmen des BioMaxEff-Projektes kostengünstige Pelletkessel mit höchster Effizienz und niedrigsten Emissionen für unterschiedliche Gebäudetypen in einem Verbundprojekt sieben ausgewählter europäischer Länder entwickelt, unter Laborbedingungen getestet und im Feld untersucht [7].

Neben der Wärmeproduktion mit reinen Feuerungsanlagen ist die Kopplung vom Strom- und Wärmeproduktion ein wichtiger Bestandteil aktueller Forschungsvorhaben. Insbesondere vor dem Hintergrund, dass mit einer Stromproduktion auch mögliche Nutzwärme anfällt. Um Strom und Wärme bedarfsgerecht bereitzustellen werden zwei mögliche Technologien verfolgt:

- **KWK-Technologie:** Hier werden Strom- und Wärme durch eine einzelne Anlage erzeugt (Gasturbine, Dampfturbine, Diesel- oder Gasmotor, Dampfmaschine, ORC-Anlage).
- **Vernetzung mehrerer Bioenergiebereitsteller:** Vor allem in größeren Objektversorgungen kann es sinnvoll sein, Erzeugeranlagen für eine bedarfsgerechte Energiebereitstellung zu kombinieren und zu einem Gesamtkonzept zu vernetzen. Als Beispiel sei hier die Kombination eines Pelletkessels mit einer Brennstoffzelle genannt. Beide Erzeugeranlagen besitzen sehr hohe Wirkungsgrade und sind in der Lage, Wärme bzw. Strom bedarfsgerecht bereitzustellen. (Eine am DBFZ befindliche kommerzielle Brennstoffzelle hat einen elektrischen Wirkungsgrad von ca. 60 % und einen thermischen Wirkungsgrad von ca. 25 %. Pelletkessel besitzen in der Regel Wirkungsgrade von über 80 % [8], [9]).

Die von der Brennstoffzelle produzierte Wärme kann dazu genutzt werden, die Start-/Stopp-Zyklen des Pelletkessels an den Übergangstagen im Frühjahr und Herbst zu reduzieren oder sogar komplett zu vermeiden. Hierdurch würde der Jahresnutzungsgrad des Pelletkessels gesteigert und die Abgasemissionen erheblich gesenkt werden. Durch die Kombination dieser beiden Erzeugeranlagen könnten Strom und Wärme bedarfsgerecht, effizient und beim Einsatz von erneuerbar gewonnenen Wasserstoff zu 100 % erneuerbar bereitgestellt werden.

Einsatz von Kaltwasserspeichern

Mit dem Einsatz von Kaltwasserspeichern sind viele Vorteile in energetischer, ökologischer, technischer und wirtschaftlicher Hinsicht erschließbar. Dies

wurde in einem Pilotprojekt nachgewiesen, welches seit 2007 erfolgreich betrieben wird [6]. Bisher sind keine dezentralen Kaltwasserspeicher mittlerer Größe im oder am Gebäude errichtet worden. Dies wurde erstmals im Laborgebäude des Fraunhofer ISE umgesetzt. Die Integration des großen Kaltwasserspeichers stellte viele Herausforderungen an die Gebäudearchitektur, die Dimensionierung, Errichtung und Abdichtung des Speichers sowie den Betrieb des Gesamtversorgungssystems. Für das Laborgebäude sollen die typischerweise im Gewerbebau eingesetzten Wärme- und Kälteversorgungssysteme auf Hoch- bzw. Niedertemperatur durch ein System mit niedrigem Exergieinsatz ersetzt werden, bei dem die Versorgungstemperaturen nahe an den gewünschten Raumtemperaturen liegen. Durch den kleineren Temperaturhub kann die Effizienz der Kühlprozesse deutlich verbessert werden. Am Standort kann aufgrund der Nutzung oberflächennaher Geothermie durch Nachbargebäude ausschließlich Außenluft als Umweltwärmesenke für die Kältebereitstellung genutzt werden.

Im Mittelpunkt des Energieversorgungskonzeptes steht eine hocheffiziente Wärmepumpe mit magnetgelagerten Turboverdichtern, die gleichzeitig Wärme und Kälte erzeugt. Als Wärmesenke steht ein großer, unterirdischer Kaltwasserspeicher mit einem Volumen von 500 m³ zur Verfügung, der Prozesse und Klimaanlage mit Hochtemperaturkälte in einem Temperaturbereich von 16 bis 22 °C versorgt. Der Speicher wird zum einen durch Außenluft, zum anderen durch das unter dem Speicher anstehende Erdreich und Grundwasser rückgekühlt („LowEx-Bestandsgewerbebauten“, BMWi, Förderkennzeichen 03ET1035A).

Netzdienlicher Betrieb von Gebäuden und Liegenschaften

Die fortschreitende Umstellung des deutschen Energiesystems auf erneuerbare Energien bringt es mit sich, dass zu bestimmten Zeiten Strom aus regenerativen Quellen im Überfluss vorhanden sein wird, wohingegen zu anderen Zeiten der Strom emissionsbelastet mit fossilen Spitzenlastkraftwerken erzeugt werden muss. Da Strom im Gegensatz zu anderen Energieformen nur schwierig speicherbar ist, müssen Stromerzeugung und Stromverbrauch zu jedem Zeitpunkt im Gleichgewicht sein. Um dies zu gewährleisten, stehen verschiedene technische Maßnahmen – sogenannte Flexibilitätsoptionen – zur Verfügung, die den Ausgleich von „zu viel“ und „zu wenig“ Strom liefern.

Unter „Lastmanagement“ (demand-response) versteht man die Änderung des zeitlichen Verlaufs des Strombezuges von Endverbrauchern als Reaktion auf ein Preissignal oder andere Anreizmechanismen. In einem Projekt des Fraunhofer ISE wird untersucht wie Gebäude, die Strom zur Wärme- und Kälteerzeugung nutzen (z. B. mit elektrischen Wärmepumpen oder Kältemaschinen) oder regelbar Strom produzieren (z. B. mit Anlagen in Kraft-Wärme-Kopplung (KWK)), zum Lastmanagement genutzt werden und somit zur Flexibilisierung des Energiesystems beitragen können („Netzreaktive Gebäude“, Förderung BMWi, Förderkennzahl 03ET1111A).

Unter „Flexibilitätsoption“ werden Maßnahmen zusammengefasst, um kurzfristig auf Schwankungen in der Stromproduktion oder Stromnachfrage zu reagieren. Dazu zählen:

- flexibilisierte und bedarfsorientiert betriebene konventionelle Kraftwerke und KWK-Anlagen
- Energieumwandlungsprozesse wie Power-to-Gas oder Power-to-Liquid
- bedarfsgerechte Erzeugung aus erneuerbaren Energien (z. B. Einspeisemanagement von Windkraft- und PV-Anlagen, stromgeführte Fahrweise von Biomasseanlagen)
- Lastmanagement (z. B. abschaltbare Lasten in Haushalt, Gewerbe und Industrie)

Die jeweiligen Flexibilitätsoptionen weisen unterschiedliche Eigenschaften auf, z. B.:

- positive und negative bereitstellbare Ausgleichsleistung
- Abrufgeschwindigkeit
- saisonale Verfügbarkeit und Ausbaupotenzial

Heute nehmen Flexibilitätsoptionen z. B. über die Regelleistungsmärkte oder die Strombörse EEX am Energiemarkt teil.

Zusammenfassung

Für eine effiziente Wärme- und Kälteversorgung für Gewerbe, Handel und Dienstleistung sind u. a. folgende Maßnahmen erforderlich:

- Maßnahmen für **Effizienzsteigerung**: hohes Potenzial über die gesamte Versorgungskette erschließen
- Integrierte Konzepte **Gebäudehülle**: Integration Haustechnik, Integration aktive Solarwandler, hohes Maß an Vorfertigung anstreben
- **Wärme- und Kälteversorgung**: Konzepte mit niedrigem Exergieinsatz machbar, Synergien zwischen Prozess- und Gebäudeversorgung nutzen

- **Wärmeerzeugung**: Nutzung von Umweltwärme und Abwärme in Kombination mit Wärmepumpen, Einsatz von Solarthermie und Biomasse
- **Speicher**: Integration von Speichern mit hoher Speicherkapazität und -leistung in Bestandsgebäuden
- **Energiemanagement**: Betriebsoptimierung, Fehlererkennung und Qualitätssicherung im Betrieb und
- Optimierung des **Gesamtsystems** mit ganzheitlichen Ansätzen

Referenzen

- [1] BMWi Zahlen und Fakten Energiedaten, Stand Februar 2013. <http://bmwi.de/DE/Themen/Energie/Energiedaten-und-analysen/energiedaten.html>
- [2] Schlesinger M (2010) Energieszenarien für ein Energiekonzept der Bundesregierung. Studie für das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie.
- [3] Bettgenhäuser K et al. (2011) Klimaschutz durch Reduzierung des Energiebedarfs für Gebäudekühlung. www.uba.de/uba-info-medien/3979.html
- [4] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung BMVBS: Systematische Datenanalyse im Bereich der Nicht-Wohngebäude – Erfassung und Quantifizierung von Energieeinspar- und CO₂-Minderungspotenzialen. BMVBS-Online-Publikation 27/2013.
- [5] Schmid et. al (2003) Möglichkeiten, Potenziale, Hemmnisse und Instrumente zur Senkung des Energieverbrauchs branchenübergreifender Techniken in den Bereichen Industrie und Kleinverbrauch. Im Auftrag des Umweltbundesamtes im Rahmen des Umweltforschungsplanes.
- [6] http://www-user.tu-chemnitz.de/~tur/ks2/pilotpr_ks.htm
- [7] BioMaxEff: Kostengünstige Pelletkessel mit höchster Effizienz und niedrigsten Emissionen, <https://www.dbfz.de/forschung/referenzprojekte/biomaxeff-kostenguenstige-pelletkessel-mit-hoechster-effizienz-und-niedrigsten-emissionen.html>, letzter Zugriff: 22.03.2016
- [8] D. BÜCHNER ; DR. J. V. SONNTAG: BioMaxEff: Kostengünstige Pelletkessel mit höchster Effizienz und niedrigsten Emissionen. Leipzig, 2014
- [9] SVEN SCHMIDT: Untersuchung zur flexiblen Strombereitstellung durch eine Brennstoffzelle, DBFZ Jahrestagung 2014, Leipzig, 1.–2. Okt. 2014

Effiziente Wärmesysteme für Wohngebäude

Die Entwicklung effizienter Wärmesysteme für Wohngebäude ist eine zentrale Aufgabe der Energieforschung. Der Wohngebäudesektor hat seit Jahren einen – witterungsbedingt leicht schwankenden – Anteil von 25–30 % am Endenergieverbrauch in Deutschland. Dabei werden über 80 % der im Sektor Haushalte verbrauchten Energie zur Bereitstellung von Wärme verwendet, im Jahr 2013 z.B. 585 TWh oder mehr als ein Fünftel des gesamtdeutschen Endenergieverbrauchs.

Da die Wärmeversorgung hauptsächlich noch über die fossilen Energieträger Erdgas und Heizöl betrieben wird, bieten Wärmesysteme für Wohngebäude ein erhebliches Potenzial für CO₂-Einsparungen. Die Energiewende im Heizungskeller beruht dabei – genau wie in anderen Sektoren auch – auf den beiden Säulen erneuerbare Energieversorgung und Effizienz.

Durch verschärfte Regelungen für Neubauten und energetische Sanierungen von Bestandsimmobilien wurde in den vergangenen Jahren ein leichter Rückgang des durchschnittlichen flächenspezifischen Heizenergiebedarfs in Wohngebäuden erreicht. Diesem Trend stand jedoch ein steigender Wohnflächenverbrauch pro Person entgegen, so dass der gesamte Heizenergieverbrauch langsamer sinkt als der spezifische Heizenergiebedarf in den Gebäuden. Die jährliche Totalsanierungsquote im Wohnbereich liegt zudem weit unterhalb der als für die Erreichung der Effizienzziele 2050 nötigen postulierten 2,7%.

Ein verstärkter Ausbau des Einsatzes erneuerbarer Energien im Heizungskeller bietet einen zusätzlichen Freiheitsgrad, der zur Erreichung der angestrebten CO₂-Minderung beitragen kann.

Forschungsbedarf und Forschungsfelder der FVEE-Institute

Der Wohngebäudebestand in Deutschland setzt sich – nach Wohnfläche bewertet – in etwa zu 40 % aus Mehrfamilienhäusern und zu 60 % aus Ein- und Zweifamilienhäusern zusammen. Das Alter der Bestandsimmobilien ist relativ gleich verteilt über die letzten 6 Dekaden. Insgesamt gibt es 18,6 Mio. Bestandsimmobilien, von denen etwa 400.000 jünger als 5 Jahre und damit auf einem energetisch dem heutigen Standard entsprechenden Niveau sind. Akuter Sanierungsbedarf besteht bei geschätzten 9 Mio. Immobilien (dena 2012).

Die FVEE-Institute unterstützen diese Aufgabe durch Forschung auf verschiedenen Ebenen. Dazu gehören die Analyse von bestehenden und geplanten Systemen – sowohl im Feld als auch in der Simulation – und die Entwicklung und Erprobung neuartiger, innovativer Wärmesysteme in Ein- und Mehrfamilienhäusern, sowohl für Neubauten wie für Bestandsimmobilien (*Abbildung 1*). Im folgenden Abschnitt werden einige dieser Arbeiten vorgestellt. Zusätzlich sind viele Institute in der Entwicklung von Wärmesystemkomponenten aktiv.



ISFH

Dr. Raphael Niepelt
niepelt@isfh.de

Oliver Mercker
mercker@isfh.de

DBFZ

Daniel Büchner
daniel.buechner@dbfz.de

DLR

Prof. Dr. Bernhard Hoffschmidt
bernhard.hoffschmidt@dlr.de

Dr. Jacob Schmiedt
jacob.schmiedt@dlr.de

Fraunhofer IBP

Johann Reiss
johann.reiss@ibp.fraunhofer.de

IZES

Christoph Schmidt
schmidt@izes.de

ZAE

Stephan Weismann
stephan.weismann@zae-bayern.de

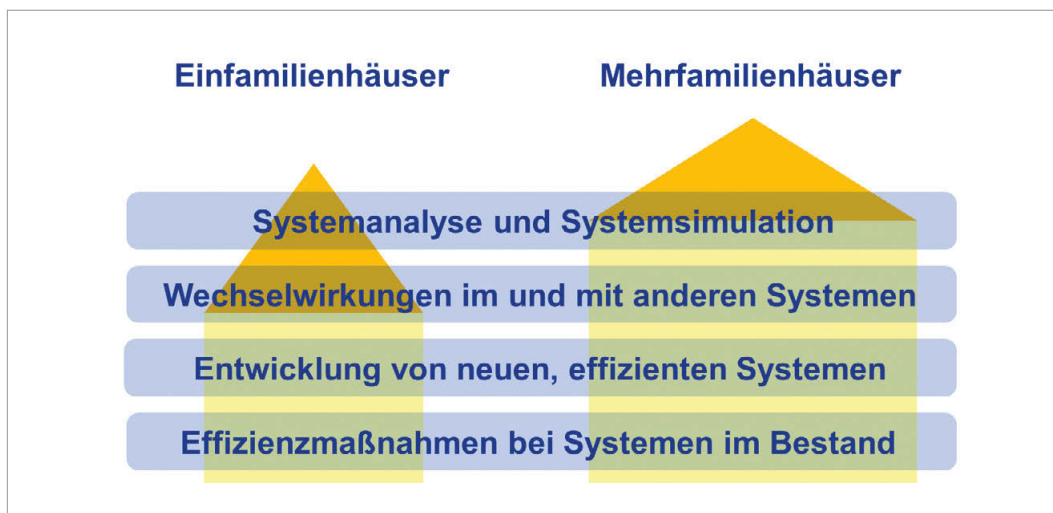


Abbildung 1
Forschung
zu effizienten
Wärmesystemen
im FVEE

Systemanalyse, -simulation und -entwicklung

Die Gebäudesimulation spielt bei der Planung von Bauvorhaben eine immer größere Rolle. Während bei Neubauten die Einbindung von Simulationswerkzeugen hauptsächlich eine Frage der Nutzerfreundlichkeit und der Kompatibilität verschiedener Programme ist, steht man im Bereich der Altbausanierung vor einer weiteren Herausforderung, nämlich dem Mangel an Informationen über die vorhandene Bausubstanz.

Luft- und satellitengestützte Analyse von Gebäuden

Mit den aktuell verfügbaren Verfahren sind genaue Informationen über bauphysikalische Eigenschaften wie U-Werte (Wärmedurchgangskoeffizienten) und Dichtheit nur mit großem Aufwand zu gewinnen. Messverfahren, die am DLR neu aus den Bereichen Solarforschung, Fernerkundung und Sicherheit auf die zerstörungsfreie Untersuchung von Gebäuden übertragen werden, sollen diesen Mangel beheben. Aus Überflughdaten von Leichtflugzeugen und Multicoptern lassen sich mit fotogrammetrischen Methoden semantisch angereicherte 3D-Modelle von Gebäuden erstellen (Frommholz 2015). Die Fusion mit Thermaldaten aus Überflügen soll Informationen über die thermischen Eigenschaften der Gebäudehülle liefern.

Neben dieser Erweiterung der bekannten Gebäudethermographie können weitere Mess- und Analysetechniken dazu dienen, zusätzliche Informationen über die Bausubstanz zu liefern. Das satellitenbasierte radarinterferometrische Verfahren Persistent-Scatterer-Interferometry ermöglicht die Erstellung dynamischer Abbildungen von Gebäuden, in denen thermische Deformationen erfasst werden können (Eineder 2013). Mikrowellenradiometrie und

Radar werden genutzt, um verborgene Gegenstände, Strukturen und Schichtaufbauten sichtbar zu machen (Peichl 2014). Aktive Thermographie sowie eine verbesserte Auswertung von Infrarotaufnahmen erhöhen Aussagekraft von Thermalaufnahmen in der Solartechnik (Röger 2014) und in der Wildrettung (Israel 2011).

Mit einer Kombination dieser Verfahren sollen quantitative Aussagen über die bauphysikalischen Eigenschaften der Gebäudehülle möglich werden, wobei diese Techniken wesentlich schnellere Analysen ermöglichen als herkömmliche Verfahren. Dies soll dazu führen, dass die genaue Untersuchung der Bausubstanz und die anschließende Simulation großflächig bei der Planung von Altbausanierungen eingesetzt werden können. Dadurch kann die Kosten- und Ressourceneffizienz der Sanierungsmaßnahmen gesteigert und so einen Anreiz für eine Erhöhung der Sanierungsrate gegeben werden.

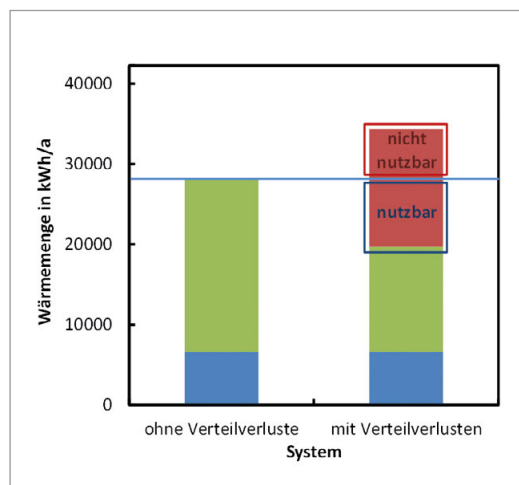
Simulation von Wärmeverteilverlusten

Die Energieeinsparung, die sich durch die Verbesserung der thermischen Hülle von Gebäuden erzielen lässt, bleibt in der Praxis oft hinter den zuvor nach EnEV berechneten Erwartungswerten zurück. Ein Teil dieser Diskrepanz kann durch die mit dem Gebäude-dämmstandard zunehmende Bedeutung der unregelmäßigen Wärmeabgabe des Wärmeverteilsystems erklärt werden. Unregelmäßige Wärmeeinträge, die auch als „Verteilverluste“ bezeichnet werden, können zu einer Erwärmung über die jeweilige Solltemperatur hinaus führen. Der damit verbundene Anstieg der Transmissions- und Lüftungswärmeverluste führt zu einem Mehrverbrauch an Heizwärme, der in einer Senkung der Effizienz der Wärmeversorgung mündet (Abbildung 2).

Vor diesem Hintergrund beschäftigt sich das ISFH-Projekt „MFH-re-Net“ unter anderem mit der Frage, wie ein (solar unterstütztes) Wärmeversorgungskonzept gestaltet sein muss, um den Wärmebedarf von Mehrfamilienhäusern so effizient wie (technisch) möglich zu decken (Arnold 2015).

Als wesentliche Optimierungsansätze werden eine Teildezentralisierung und eine solare Unterstützung der Wärmeversorgung untersucht. Simulationen zeigen, dass Zweileiternetze (Heizwasserleitung, mittels der das Trinkwarmwasser in dezentralen sog. Wohnungsstationen bereit wird) einen systematischen energetischen Vorteil gegenüber Vierleiternetzen aufweisen, der durch eine geeignete dezentrale Nacherwärmung des Trinkwarmwassers nochmals gesteigert werden kann. Überdies zeigt sich, dass eine starke zeitliche Korrelation zwischen nicht nutzbaren Verteilverlusten und solarem Strahlungsangebot besteht. Wird die Deckung nicht nutzbarer

Abbildung 2
Verteilverluste:
Nutzbare und nicht nutzbare Wärmeverluste in einem MFH mit 74 kWh/(m²a) Wärmeverbrauch.



Verteilverluste bei der Dimensionierung der Solarthermieanlage entsprechend berücksichtigt, können somit weitere Effizienzpotenziale erschlossen werden. Diese Ergebnisse liefern wichtige Anhaltspunkte für die energetische Sanierung von Bestandsimmobilien genauso wie für neu geplante Mehrfamilienhäuser.

Wärmesysteme mit prädiktiver Regelung

Wärmeversorgungssysteme bedienen sich heutzutage häufig noch immer sehr einfacher Strategien zur Regelung. Meist wird jedes Teilsystem (Heizkreis, Pelletkessel, solarthermische Anlage, Speicher etc.) unabhängig voneinander gesteuert, während das Verhalten des Gesamtsystems unberücksichtigt bleibt. Die Effizienz von Kombianlagen hängt nicht selten von den Fähigkeiten des Planers beziehungsweise des Installateurs ab, da Betriebsparameter nach der Installation üblicherweise nur beim Auftreten einer größeren Störung angepasst werden. Die Folge ist häufig ein ineffizienter Anlagenbetrieb, der für den Hausbesitzer aufgrund der fehlenden Messtechnik kaum erkennbar ist (Bemmann 2006). Im Rahmen von Untersuchungen konnte eindeutig gezeigt werden, dass sich z. B. bei Pellet-Solar-Kombianlagen durch schlechte Regelung ein höherer Bedarf an elektrischer Hilfsenergie, hohe Speicherverluste sowie eine mangelhafte Ausnutzung der solaren Strahlungswärme ergeben, die in Summe zu Tagesnutzungsgraden des Pelletkessels von 60 % und weniger führen können (Schraube 2010). Um den Endenergieverbrauch und damit die Betriebskosten häuslicher Kombianlagen zu minimieren, soll im Projekt „KombiOpt-EMS“ (Abbildung 3) am DBFZ zusammen mit EIFER eine übergeordnete, zentrale Gebäuderegulation entwickelt werden. Diese soll selbsttätig und automatisch die erforderlichen Anpas-

sungen der Betriebsparameter der Einzelkomponenten vornehmen und dabei so universell gestaltet sein, dass eine spätere Adaption auf unterschiedliche Gebäude und Systemkonfigurationen möglich ist.

Neben einem prädiktiven Speichermanagement stellt die automatische Anpassung der Betriebsweise der Heizeinheit den wesentlichen Schwerpunkt der Arbeiten dar.

Das Regelungskonzept wird mittels dynamischer Simulationssoftware sowie entsprechender labortechnischer Untersuchungen entwickelt. Die erforderliche Optimierung der energetischen Gebäudeperformance umfasst dabei im Wesentlichen die Berechnung der zur Minimierung der Kostenfunktion erforderlichen Steuer- und Regelgrößen (Kummert 1999). In der zweiten Projekthälfte soll der Regelungsalgorithmus in einem Referenzgebäude, bestehend aus einem Pelletkessel und einer solarthermischen Anlage in Kombination mit einem Wärmespeicher, auf seine Praxistauglichkeit untersucht werden.

Außenliegende Wandheizung

Seit 2002 beschäftigt sich die IZES gGmbH mit der Thematik der Beheizung durch Wandtemperierung. Der Kern dieser Technik ist die außenliegende Wandheizung (aWH). Dies ist eine Flächenheizung, die zwischen Bestandswand und einem neuen Wärmedämmverbundsystem (WDVS) aufgebracht wird. Eine aktuelle Weiterentwicklung ist die außenliegende Luftheizung (aLH). Diese stellt eine niederexergische Erweiterung der aWH dar, in dem zwischen Bestandswand und Wärmedämmung zusätzlich ein Luftspalt ausgebildet wird. Durch diesen Luftspalt wird Außenluft geführt und anschließend dem Gebäude als temperierte Zuluft zur Verfügung gestellt.

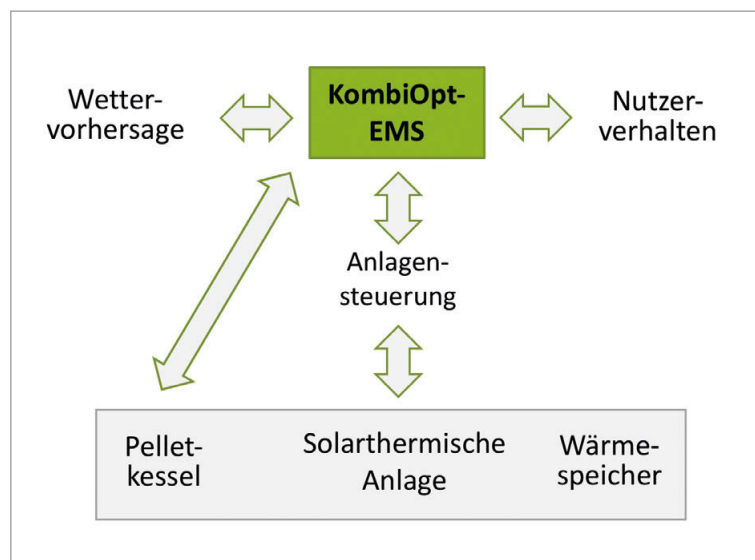


Abbildung 3
Zentrale Gebäuderegulation:
Schema der prädiktiven Regelung eines Kombi-Wärmesystems in Wohngebäuden

Beide Systeme sind perspektivisch als Nachrüstsysteme für Bestandimmobilien geeignet, wobei der große Vorteil darin besteht, dass das neue Heizsystem bei laufendem Betrieb von außen an das Gebäude angebracht werden kann.

Aktuell wird ein Feldtestversuch in enger Kooperation mit dem Lehrstuhl für Automatisierungs- und Energiesysteme der Universität des Saarlandes (UdS) an einem Bürogebäude aus den 70er Jahren durchgeführt (Abbildung 4).

Im Zuge einer Betonsanierung wird eine Fassade auf ca. 140 m² mit der außenliegenden Wandheizung und auf ca. 6 m² mit der außenliegenden Lüftung belegt. Die Komponenten werden mit einem LowEx-Heizsystem, bestehend aus Eisspeicher, Wär-

mepumpe (6 kWth) mit Pufferspeicher und PVT-Kollektoren (photovoltaisch-thermische Hybrid-Kollektoren mit 12 Modulen; insgesamt ca. 20 m² Bruttofläche) kombiniert. Primäre Wärmequelle der Wärmepumpe ist der Eisspeicher, welcher wiederum vorrangig über die PVT-Kollektoren regeneriert wird. Aufgrund der lagebedingt niedrigen, notwendigen Vorlauftemperaturen der aWH ist jedoch auch die direkte Anbindung der PVT-Kollektoren an die Außenwandtemperierung denkbar. Zusätzlich kann über die Verwendung von PVT-Kollektoren die Nutzung von Eigenstrom für die Wärmepumpe untersucht und optimiert werden.

Temperaturpufferung in Solar-Luft-Systemen mit Phasenwechselmaterialien

Solar-Luft-Systeme, bei denen durch solare Einstrahlung direkt die Zuluft einer Lüftungsanlage erwärmt wird, bieten einen innovativen Ansatz der direkten Nutzung von Solarenergie. Wie bei anderen solaren Techniken auch ist die Produktion von Wärme an die solare Einstrahlung gekoppelt.

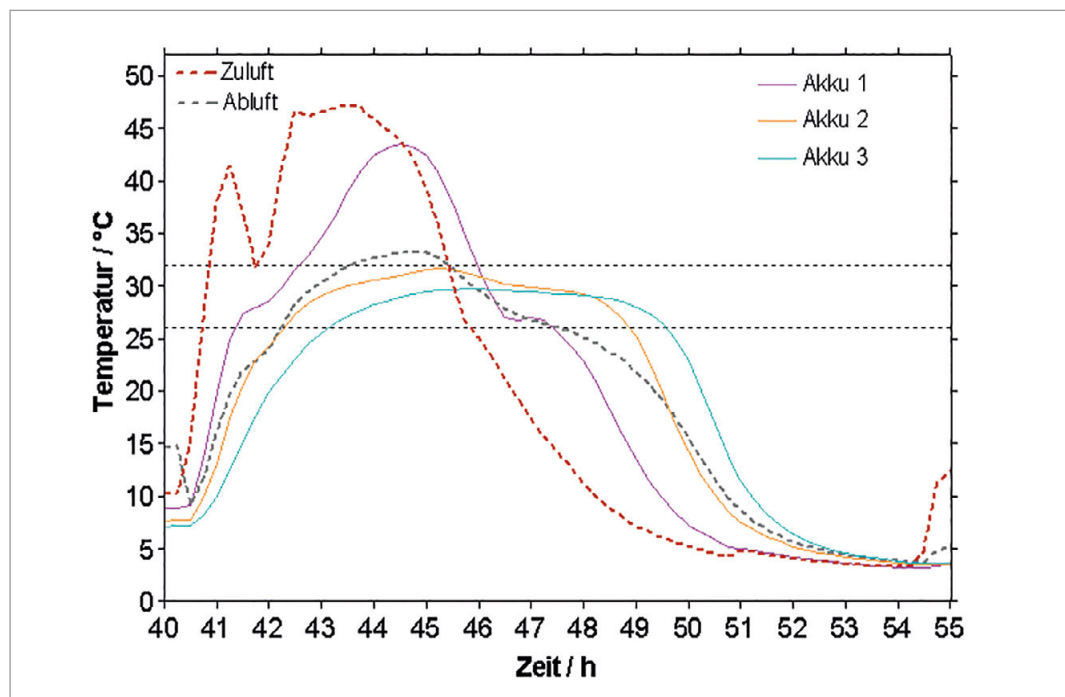
Die Verwendung von Phasenwechselmaterialien (PCM) ermöglicht die Pufferung von Temperaturspitzen und kann ein auftretendes solares Energieüberangebot über einen Zeitraum von einigen Stunden zwischenspeichern (Abbildung 5).

Auf diese Weise steht auch in Zeiten mit nur geringem solarem Energieangebot ausreichend Wärme zur Verfügung, so dass der Primärenergieverbrauch deutlich gesenkt werden kann. Die PCM-Wärmespeicher zeichnen sich dabei durch eine höhere

Abbildung 4
Außenliegende Wandheizung:
Links: Aufbau der Flächentemperierung
Rechts: Verputzung der Heizmatten während der Sanierung von außen



Abbildung 5
PCM im Solar-Luft-Wärmesystem:
Be- und Entladung von PCM-Speichern zur zeitverzögerten Heizungsunterstützung



Leistungsdichte aus, so dass im Vergleich zu Wasserspeichern mehr Wärme in einer leichteren Speichereinheit gespeichert werden kann. Durch Untersuchungen an Funktionsmustern konnte am ZAE Bayern ein aussichtsreiches Konzept für den Einsatz von PCM in einem Solar-Luft-System ermittelt werden. Es wurde ein seriennaher Prototyp eines Speichers zum Einsatz in Lüftungsanlagen mit solarer Frischluftherwärmung entwickelt und im praktischen Einsatz über mehrere Jahre erfolgreich erprobt.

Systeme in der Praxis

Die Praxiserprobung ist ein wesentliches Werkzeug für die Bewertung der im Forschungsverbund entwickelten Systemtechnologien unter realistischen oder realen Bedingungen. In Modellhäusern und Quartieren können innovative Wärmesysteme überprüft und bei Bedarf weiterentwickelt werden.

Sonnenhaus nutzt Gebäudemasse als Wärmespeicher

Sonnenhäuser sind Gebäude mit einem sehr guten Wärmedämmstandard, deren Wärmeversorgung zu mehr als der Hälfte solarthermisch erfolgt. Meist werden diese Häuser mit einem mehrere Kubikmeter großen Wärmespeicher ausgestattet, der die Speicherung der Solarwärme über einige Tage bis Wochen gewährleisten kann. In einem am ISFH entwickelten neuen Konzept (Glembin 2015) wird ein kleiner konventioneller Wärmespeicher mit einer direkt solarthermisch versorgten Bauteilaktivierung von Massivdecken im Gebäude kombiniert. Statt eines üblicherweise eingesetzten Holzofens kommt eine Wärmepumpe als Nachheizung für sonnenarme Tage zum Einsatz. Das neue Konzept benötigt lediglich einen etwa einen Kubikmeter großen Speicher. Das trägt zu einer deutlichen Kostenreduktion bei, weil viel Platz eingespart werden kann. Zudem ist das System erheblich komfortabler, da sommerliche Speicherverluste erheblich weniger zur Überhitzung beitragen.

Das Konzept wurde unter Zuhilfenahme von dynamischen Systemsimulationen entwickelt, dimensioniert und charakterisiert. Die gewonnenen Erkenntnisse sind in den Bau eines Gebäudeprototyps im Stadtgebiet Hannovers eingeflossen, der im Januar 2015 in Betrieb genommen wurde (Abbildung 6).

In einem jetzt begonnenen Forschungsvorhaben werden die Wissenschaftler das Konzept zwei Betriebsjahre lang auf Praxistauglichkeit und Robustheit testen, um aus den Ergebnissen Planungsleitlinien für ein serienreifes Produkt abzuleiten.

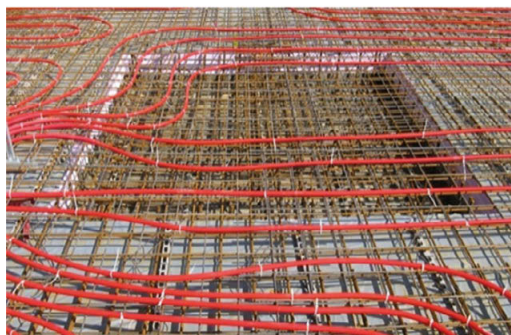


Abbildung 6

Sonnenhaus:
Oben: Prototyp mit Bauteilaktivierung als thermischem Speicher
Unten: Rohrverlegung zur Bauteilaktivierung in der Zwischendecke während der Bauphase

Saniertes Mehrfamilienhaus mit CO₂-neutraler Wärmeversorgung

In einem Projekt des Fraunhofer IBP wurde in der Lilienstraße in München eine beispielhafte energetische Sanierung einer MFH-Anlage mit 149 Wohneinheiten durchgeführt (Abbildung 7). Durch die Kombination von hocheffizienten Dämmsystemen und wärmeschutzverglasten Fenstern wurde der Wärmebedarf der vier Häuserblöcke gesenkt.



Abbildung 7

Energetische Sanierung
Mehrfamilienhäuser in München vor und nach der energetischen Sanierung

Der Restwärmebedarf wird über oberflächennahe Geothermie und eine Gasmotorkompressionswärmepumpe gedeckt, die in bivalenter Konstellation zusammen mit einem Brennwertspitzenlastkessel betrieben wird. Die Wärmeverteilung auf die im Rahmen der Sanierung attraktiver zugeschnittenen Wohnungen erfolgt nach Bedarf durch dezentrale an den Heizkörpern installierte Pumpen. Auf dem Dach eines Hauses wurden thermische Kollektoren zur solaren Trinkwarmwasser- und Heizungsunterstützung installiert. Die restlichen Dächer der Anlage wurden mit Photovoltaik ausgestattet.

Im ersten Betriebsjahr nach der Sanierung wurde für Beheizung und Trinkwassererwärmung ein Verbrauch von etwa 50 kWh/(m²a) erreicht, was unter dem aktuellen Neubauniveau liegt. Die Nutzung der erneuerbaren Energien auf den Dächern ermöglicht eine CO₂-neutrale Bilanz der Wohnanlage, die aufgrund von Einfahrtsschwierigkeiten mit dem Wärmepumpenprototyp noch nicht erreicht wurde, aber in Reichweite ist.

Literaturverzeichnis

- (Altgeld 2002) Altgeld, H., Luther, G., Die außen liegende Wandheizung, Gesundheits-Ingenieur, Haustechnik • Bauphysik • Umwelttechnik 1/2002, pp. 8–15, 2002.
- (Arnold 2015) Arnold O. et al., Untersuchung (solarer) Wärmeversorgungskonzepte für Mehrfamilienhäuser in TRNSYS, OTTI 25. Symposium Thermische Solarenergie, Bad Staffelstein, 2015.
- (Bemmann 2006) Bemmann U. et al., Guideline for Combined Solar Thermal and Wood Pellet Heating Systems, Project Sollet – European Network Strategy for Combined Solar and Wood Pellet Heating Systems for Decentralised Applications, 2006.
- (dena 2012) dena-Sanierungsstudie Teil 2: Wirtschaftlichkeit energetischer Modernisierung in selbstgenutzten Wohngebäuden, Begleitforschung zum dena-Projekt „Niedrigenergiehaus im Bestand“, www.dena.de, abgerufen im Dezember 2015.
- (Eineder 2013) Eineder, M., et al., Globale Kartierung und lokale Deformationsmessungen mit den Satelliten TerraSAR-X und TanDEM-X, Vol. 1/2013, pp. 75-84, 2013.
- (Frommholz 2015) Frommholz, D., et al., Extracting Semantically Annotated 3D Building Models with textures from oblique aerial imagery. ISPRS-Int. Arch. Photogram. Remote Sens. Spatial Inf. Sci. 1, pp. 53–58, 2015.
- (Glembin 2015) J. Glembin et al., Entwicklung eines Konzepts zur temperaturoptimierten Wärmebedarfsdeckung in Solaraktivhäusern, Fachlicher Abschlussbericht zu BMWi Vorhaben (FKZ 0325981A), 2015.
- (Israel 2011) Israel, M., A UAV-based roe deer fawn detection system. Int. Arch. Photogram, Remote Sens. Spatial Inf. Sci. XXXVIII-1/C22, pp. 51–55, 2011.
- (Kummert 1999) Kummert M. et al., Building and HVAC optimal control simulation: Application to an office building, 3th International Symposium on HVAC, 1999.
- (Peichl 2014) Peichl, M., Dill, S. and Kempf, T., Determination of truck load by microwave and millimeter-wave imaging, Proc. of SPIE Defence Security + Sensing Symposium – Passive and Active MMW Imaging XVII, 2014.
- (Röger 2014) Röger, M., et al., A Transient Thermography method to Separate Heat Loss Mechanisms in Parabolic Trough Receivers, Journal of Solar Energy Engineering 136, pp. 011006-1 - 011006-9, 2014.
- (Schraube 2010) Schraube C. et al., Long-term monitoring of small pellet boiler based heating systems in domestic applications, 18th European Biomass Conference and Exhibition, Lyon, 2010.

Wärme und Effizienz für die Industrie

1 Einleitung

Im Rahmen der Energiewende haben sich erneuerbare Energien zur Stromerzeugung in Deutschland bereits etabliert. Um jedoch das volle Potenzial der Reduktion von fossilen Energien und Treibhausgasen (THG) auszuschöpfen, muss aus der Energiewende auch eine Wärmewende werden. Der Energieeinsatz für die Wärmebereitstellung der Industrie betrug im Jahr 2012 etwa 535 TWh (22 % des Endenergiebedarfs Deutschlands), hauptsächlich bereitgestellt durch Erdgas (48 %) und Steinkohle (17%)¹. Damit wurden für die Wärmebereitstellung im Industriesektor rund 159 Mio. t CO_{2-äq} emittiert, was 17% der THG-Emissionen Deutschlands entspricht.

Aufgrund der Vielseitigkeit der einzelnen Branchen und Wärmeanwendungen im Industriesektor kann dieser Beitrag nur beispielhaft einzelne Komponenten für eine Wärmewende aufzeigen, die auch wiederum die Aktivitäten der einzelnen Autoren widerspiegeln. Ausgehend von einer nationalen Betrachtung und expliziten Modellierungsergebnissen für die energieintensive Industrie in NRW, werden einzelne Potenziale und Aktivitäten im Bereich der Wärmebereitstellung, -speicherung und -integration behandelt.

¹ Berechnet auf Basis *Energiebilanzen der Bundesrepublik Deutschland – Jahre 1990–2012*, Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen (AGEB) und *Datenbasis zur Bewertung von Energieeffizienzmaßnahmen 2008*, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, 2012.

2 Abwärmepotenziale

Das IZES konnte für das verarbeitende Gewerbe ein theoretisches Abwärmepotenzial von 225 TWh pro Jahr nutzbarer Abwärme ermitteln.² Dies sind 36 % des gesamten Endenergieanteils des verarbeitenden Gewerbes. Auch könnten daraus theoretisch 37 TWh Strom mit Hilfe heutiger Abwärmetechnologien erzeugt werden. Aufgrund der Heterogenität der Branchen, verbunden mit den jeweiligen vielfältigen Produktionsprozessen, ist die Ermittlung eines belastbaren technischen Potenzials nicht möglich. Im Rahmen des Forschungsprojekts „Abwärmeatlas“³ versucht man hier eine genauere Datengrundlage für vorhandene Abwärmepotenziale im verarbeitenden Gewerbe zu generieren. Effizienztechnologien zur Abwärmenutzung und Abwärmeverstromung stehen aktuell vor den Herausforderungen der Wirtschaftlichkeit. Ihre Investitionskosten sind im Vergleich zu klassischen Strom- und/oder Wärmeerzeugungsanlagen noch hoch. Gerade im verarbeitenden Gewerbe, wo nutzbare Abwärmepotenziale vorhanden sind, jedoch auch strenge Wirtschaftlichkeitskriterien herrschen, ist die Verbreitung von Effizienztechnologien noch nicht selbstverständlich. Die nachfolgende Übersicht (*Tabelle 1*) gliedert die Technologien nach Temperaturniveaus.

² Abwärmenutzung – Studie zur Fachkonferenz vom 4. März 2015; Auftraggeber: co2online & BMUB
Internet: <http://www.izes.de/deutsch/termine-veranstaltungen/2015/bmub-fachtagung-klimaschutz-durch-abwaermenutzung.html>
³ Das Forschungsprojekt „Abwärmeatlas“ wird unter der FKZ 03ET1208 von Seiten des Fraunhofer Institut für Physikalische Messtechnik (Koordinator), dem Institut für Demoskopie Allensbach (IfD Allensbach) und der IZES gGmbH (Institut für ZukunftsEnergieSysteme) gemeinsam mit den beiden strategischen Partnern, dem Statistischen Bundesamt (DESTATIS) und Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung e. V. (DIW Berlin), umgesetzt.



FZ Jülich
Dr. Alexander Otto
a.otto@fz-juelich.de
Dr. Thomas Grube
th.grube@fz-juelich.de

DBFZ
Dr. Andreas Ortwein
andreas.ortwein@dbfz.de

DLR
Dr. Stefan Zunft
stefan.zunft@dlr.de

Fraunhofer IBP
Jan Kaiser
jan.kaiser@ibp.fraunhofer.de
Dr. Michael Krause
michael.krause@ibp.fraunhofer.de

Fraunhofer ISE
Prof. Dr. Werner Platzer
werner.platzer@ise.fraunhofer.de

ISFH
Elisabeth Schneider
schneider@isfh.de

IZES
Guillem Tänzler
taenzler@izes.de

Wuppertal Institut
Clemens Schneider
clemens.schneider@wupperinst.org

ZAE
Andreas Krönauer
andreas.kroenauer@zae-bayern.de

Temperatur	Hochtemperaturbereich	Mitteltemperaturbereich	Niedertemperaturbereich
	> 350 °C	> 80 °C <= 350 °C	<= 80 °C
Beispiele für Anwendungen	Dampfturbine	ORC (Organic Rankine Cycle)	Wärmepumpen zur Abwärmenutzung
	Stirlingmotoren	Absorptionskälteanlage	Adsorptionskälteanlage
		Fernwärme- und Nahwärmenetze	Heizungs- und Brauchwassernutzung
	Thermoelektrische Systeme		Vorwärmung, Rücklauf-temperaturerhöhung
	Wärmespeichersysteme		

Tabelle 1
Technologien zur Wärmenutzung nach Temperaturniveaus
(Einteilung: IZES gGmbH)

3 Wärmebedarf und Energieeffizienzpotenziale am Beispiel der nordrhein-westfälischen Industrie

Im Rahmen des Beteiligungsprozesses zum Klimaschutzplan NRW wurden im bottom-up-Energiesystem- und Treibhausgasmodell WISEE der Energiebedarf sowie die energie- und prozessbedingten Treibhausgas-Emissionen der nordrhein-westfälischen Industrie ermittelt. Die Annahmen hierzu sind in der Dokumentation der Szenarien des Beteiligungsprozesses näher erläutert.⁴ Wie in *Abbildung 1* zu erkennen ist, wird der Wärmebedarf der nordrhein-westfälischen Industrie stark von der chemischen Industrie sowie der Eisen- und Stahlindustrie dominiert. Als ausgewählte Ergebnisse des Modells können folgende Punkte festgehalten werden:

- Absolute technische Effizienzpotenziale sind gering, da in konventionellen Prozessen sehr weit ausgeschöpft.
- THG-Emissionsreduktion um 28 % bzw. 45 % gegenüber 2010 wird erreicht durch Energieeffizienz und Energieträgershift hin zu Strom und Wasserstoff (ohne Industriekraftwerke).
- Weitere THG-Emissionsreduktion im Bereich der Industriekraftwerke

4 Zeiss, C.; Fishedick, M.; Espert, V. Zusammenfassung der Szenarioberechnungen des Beteiligungsprozesses zum Klimaschutzplan NRW (aktualisierte Fassung); Wuppertal Institut im Auftrag des Ministeriums für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen: Düsseldorf & Wuppertal, Germany, 2014.

Unter diesen Bedingungen wird eine territoriale Minderung der THG in NRW um 80 % gegenüber 1990 auch im Gesamtsystem nicht erreicht. Um diese Minderungen zu erreichen bedarf es starker Anstrengung im Bereich F&E.

4 Wärmebereitstellung für die Industrie

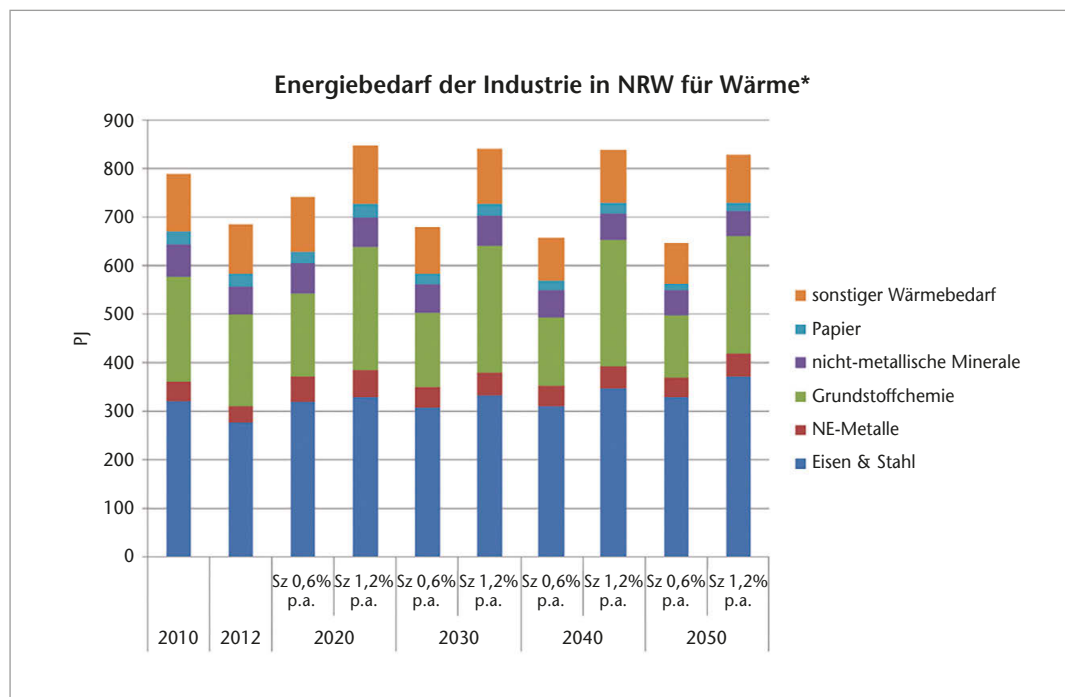
Im folgenden Abschnitt werden einige Beispiele für eine CO₂-arme beziehungsweise effiziente Bereitstellung von Wärme für die Industrie beschrieben.

4.1.1 Solarthermie

Wärmeverbrauch und Energiekosten in Industrie und gewerblichen Betrieben können substantiell durch die Kombination von Energieeffizienzmaßnahmen und Einbindung solarer Wärme reduziert werden. Wärme auf unterschiedlichen Temperaturniveaus, von 50 °C bis etwa 400 °C, wird in verschiedenen Prozessen wie z. B. Waschen, Trocknen, Sterilisieren, Destillieren, Bleichen usw. benötigt.

Ein großer Anteil des Wärmebedarfs der Industrie liegt bei Temperaturen, die auch mit solarthermischen Anlagen bedient werden können. In der Praxis haben Betriebe oft mehrere Wärmeverbraucher, die über ein Wärmeverteilnetz bedient werden. Dadurch ergibt sich eine Vielzahl von möglichen Integrationsstellen für die Solarwärme. Für die Wäschereibranche wurden diese im Projekt SoProW untersucht und für eine typische Modellwäscherei dargestellt. Die Bewertung dieser Varianten erfordert

Abbildung 1
Endenergiebedarf der Industrie in NRW für Wärme in den Beteiligungsprozess-Szenarien B und C mit einem Industriewachstum von 1,2 % bzw. 0,6 % p.a.
(Quelle: Wuppertal Institut)
*) Inkl. Bedarf an Reduktionsmitteln in der Stahlindustrie und Energie für die Aluminium-Schmelzflusselektrolyse



vom Planer eine Simulation mit unterschiedlichen technischen Konzepten unter Berücksichtigung von Bedarfsprofilen, Leistungsspitzen sowie Wärmerückgewinnungspotenzialen.

Während in Deutschland im wesentlichen Flach- und Vakuumröhrenkollektoren zur Verfügung stehen, sind für Exportmärkte mit höheren Anteilen direkter Solarstrahlung auch konzentrierende Kollektoren interessant. Innerhalb der IEA Task Group 49 (<http://task49.iea-shc.org/>) zu solarer Prozesswärme wurden Prüfmethode und Systemintegration insbesondere auch neuer Kollektortypen untersucht und weltweit gelungene Fallbeispiele dokumentiert. Die Task Group hat als Ziel ein Planungshandbuch für zukünftige Projektakteure, in das die bisherigen Erfahrungen einfließen.

4.1.2 SolStyro – Solar unterstützte Styropor-Herstellung mit hocheffizienten Flachkollektoren

Das Projekt SolStyro⁵ setzt sich zum Ziel, eine Demonstrationsanlage mit neuartigen hocheffizienten Flachkollektoren zur Unterstützung der Herstellung von expandiertem Polystyrolschaum (EPS) zu realisieren und zu bewerten. Inhaltlich umfasst das Projekt folgende Schwerpunkte:

- Weiterentwicklung eines hocheffizienten Flachkollektors für Prozesswärme

Zur Verbesserung der Wirtschaftlichkeit eines vom ISFH bereits entwickelten, hocheffizienten Flachkollektors mit spektral selektiver, doppelt verglaste Abdeckung werden das Format erweitert (von 2 auf 8 m²) und konstruktive Anpassungen (u. a. durch dünnere Verglasung) untersucht. Im Rahmen der Pilotanlage wird anschließend erstmalig das Verhalten des Kollektors im Feld getestet.

- Integration solarthermisch erzeugter Prozesswärme in den Produktionsprozess von EPS

Nach einer detaillierten Analyse des Produktionsprozesses werden mit Hilfe von Simulationsstudien Lösungen für eine energetisch und wirtschaftlich optimierte Integration der Solaranlage erarbeitet. Dabei werden auch potenzielle Energieeffizienzmaßnahmen berücksichtigt. Das entwickelte Anlagenkonzept wird im weiteren Projektverlauf baulich umgesetzt sowie in einer einjährigen Monitoringphase optimiert.

Eine solarthermische Bereitstellung von 10 % des Primärenergiebedarfs (1,5 GWh_{th}) der EPS-Herstellung, bei Temperaturen von 45 °C bis 110 °C führt zu einer Energieeinsparung von 150 MWh_{th}/a. Dies entspricht einer Reduktion von ca. 15.000 m³/a an Erdgas und somit von 30 t CO₂-Emissionen pro Jahr.

4.2 Biomasse

Im Jahr 2012 wurden etwa 6 % des Wärmebedarfs (entspricht 122 PJ) der Industrie durch Biomasse bereitgestellt.⁶ Damit wurden insgesamt 12,5 % der gesamten im Jahr 2012 energetisch genutzten Biomasse in Höhe von 970 PJ in Industrieanlagen verbrannt. Die derzeit noch zur Verfügung stehenden technischen Potenziale, unter Berücksichtigung regulatorischer oder gesellschaftlicher Beschränkungen, liegen bei etwa 448 PJ. Ausgehend von diesem Potenzial kann theoretisch, ohne Berücksichtigung von technischen Beschränkungen oder sonstigen Effekten, ein Teil der derzeit verwendeten fossilen Brennstoffe bzw. des verwendeten Stromes zur Wärmeerzeugung in der Industrie durch Biomasse substituiert werden.

Der stärkste Effekt zur Reduktion von CO₂-Emissionen in Höhe von 50 Mio. t pro Jahr wird dann erreicht, wenn die Energieträger Kohle und Strom durch das vorhandene Biomassepotenzial ersetzt werden. Wobei dieser Wert als theoretische Obergrenze zu verstehen ist, da beispielsweise die CO₂-Emissionen der Biomasseversorgungskette nicht berücksichtigt werden.

Generell ergeben sich für die Nutzung von Biomasse in der industriellen Erzeugung von Prozesswärme und Strom verschiedene Perspektiven und Forschungsansätze. Dazu gehören unter anderem:

- Verfügbarkeit zur Vermeidung von Stillständen
- Kombinationsmöglichkeiten mit anderen erneuerbaren Energien z. B. zur Temperaturerhöhung und Leistungsausgleich von solarthermischen Anlagen
- Kaskadennutzung von Biomasse

Diese und weitere komplexen Fragestellungen können am besten im Rahmen ganzheitlicher Forschungsansätze bearbeitet werden. Ein Beispiel dafür ist das Spitzencluster „BioEconomy“, in dem die gesamte Nutzungskette von der Holzbereitstellung bis zur energetischen Nutzung der Reststoffe in verschiedenen Forschungsvorhaben untersucht wird.

4.3 Kraft-Wärme-Kopplung (KWK)

Bei der KWK werden Strom und Wärme in einer Anlage gleichzeitig gewonnen und genutzt. Dabei werden Wirkungsgrade von über 90 % erreicht, wodurch eine Senkung des Primärenergieeinsatzes und somit auch der Emissionen gegenüber der

⁵ gefördert durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt (AZ: 32455).

⁶ Datenbasis: Studie für die Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e. V. (AGEB): Erstellung von Anwendungsbilanzen für das Jahr 2012 für das verarbeitende Gewerbe mit Aktualisierungen für das Jahr 2009–2011, Karlsruhe 2013.

getrennten Erzeugung von Wärme und Strom ermöglicht wird. KWK-Anlagen stellen gewöhnlich Wärme bis 300 °C bereit. Im Jahr 2013 wurden in der Industrie 28,9 TWh Strom und 84,8 TWh Wärme (40 % der Wärme bis 300 °C) über KWK bereitgestellt und somit etwa 12 Mio. t CO₂ gegenüber der ungekoppelten Strom- und Wärmeumwandlung eingespart.⁷ Am weitesten verbreitet ist die KWK in Branchen, die sowohl einen hohen Strom- als auch Wärmebedarf aufweisen, wie beispielsweise in der Grundstoffchemie, Zellstoff- und Papierindustrie. Nach einer Studie⁸ im Auftrag des BMWi besteht für das Jahr 2050 das Potenzial, dass 45 bis 59 TWh Strom und 111 bis 132 TWh Wärme durch KWK bereitgestellt werden. Je nachdem, welche Annahmen für 2050 für die Emissionsfaktoren des deutschen Strom- und Wärmemixes angenommen werden, könnten etwa 3 bis 20 Mio. t an CO₂ gegenüber der ungekoppelten Umwandlung eingespart werden.

5 Wärmespeicherung

Wärmespeicher dienen dazu, Abwärme von Wärmequellen aufzunehmen und bei Bedarf an Wärmesenken abzugeben. Dadurch kann Abwärme effektiver und zeitunabhängig genutzt und der Einsatz von Primärenergie und die daraus resultierenden THG-Emission verringert werden. Im interessanten Temperaturbereich ab 100 °C liegt die untere Grenze für Abwärmeaufkommen in Abgasströmen der Industrie – die nach dem Bundes-Immissionsschutzverordnung (BImSchV) erfasst werden – je nach Berechnungsmethode und Quelle bei 127 bis 500 PJ. Im Folgenden werden zwei Beispiele für den Einsatz eines stationären und eines mobilen Wärmespeichers aufgeführt:

5.1 Stationäre Wärmespeicher

Oft fällt Abwärme aus Industrieprozessen nicht kontinuierlich an, da viele Prozesse chargenweise betrieben werden. Aus diesem Grund können stationäre Wärmespeicher in der Industrie zur energieeffizienteren Produktion von Produkten eingesetzt werden. Diese nehmen die diskontinuierlich anfallende Abwärme aus dem energieintensiven Prozess auf und stellen sie einer geeigneten Wärmesenke zur Verfügung.

Im Rahmen einer Studie zur Nutzung der Abwärme aus dem Ofenabgas eines Elektrolichtbogenofens wurde ein Referenzkonzept mit Hilfe eines 2-Tank-

Speichers erstellt. Da der Recyclingprozess von Stahlschrott ein sehr energieintensiver Prozess ist, entstehen enorme Abwärmemengen, die bislang ungenutzt blieben. Ungefähr 18 % der im Prozess eingesetzten Energie geht über das Rauchgas des Elektrolichtbogenofens verloren. Mit Hilfe eines Wärmeübertragers wird diese Energie zu einem Großteil auf eine sensible Flüssigsalzschnmelze übertragen, welche gleichzeitig auch als Speichermedium dient. Durch die hohen Abgastemperaturen kann die Salzschnmelze auf eine Temperatur von bis zu 400 °C aufgeheizt und so eine mittlere thermische Leistung von ca. 10 MW zurückgewonnen werden. Da im untersuchten Stahlwerk keine Wärmesenken zur Verfügung standen, wurde aus dem Speicher ein kontinuierlicher Rückverstromungsprozess mit einer elektrischen Leistung von 2,9 MW versorgt.

5.2 Mobile Wärmespeicher

Mobile Speicher können Abwärmepotenziale erschließen, die mit leitungsgebundenen Transportsystemen nicht kosteneffizient zu erschließen sind. Technische und ökonomische Betrachtungen lieferten vielversprechende Ergebnisse um mit einem mobilen Speicher konkurrenzfähige Wärmegestehungskosten im Vergleich zu fossilen Energieträgern zu erreichen. Dies konnte am Beispiel einer Demonstrationsanlage mit einem offenen Sorptionsprozess eines 14 t-Zeolith-Speichers, der über ein Jahr betrieben wurde, gezeigt werden. Als Abwärmequelle diente Anzapfdampf aus einer Turbine in einer Müllverbrennungsanlage und als Wärmeabnehmer ein industrieller Trocknungsprozess. Es konnten pro Transportzyklus Gaseinsparungen von 3,7 MWh und CO₂-Einsparungen von 400 kg erreicht werden. Die Wärmegestehungskosten lagen bei 150 EUR/MWh für die Demonstrationsanlage, wobei die Kosten für geeignete Anwendungen und bei einer Kleinserienproduktion der Speicher auf 73 EUR/MWh reduziert werden können.

6 Bewertungsmethodik für Industriegebäude

Universelle Gewerke übergreifende Planungstools sind eine Grundvoraussetzung für die Erstellung und den Betrieb von energie- und emissionsoptimierten Produktionsstätten. Der bedeutende Aspekt ist hier die Berücksichtigung der Interaktion von Produktionsprozessen, der Gebäudeinfrastruktur und der Gebäudegestaltung bei der Planung neuer Produktionsgebäude. Durch die Koppelung thermischer Simulationsmodelle mit prozesstechnischen Berechnungsmethoden kann der Einfluss von Pro-

⁷ Berechnet auf Basis: AGEB, Auswertungstabellen zur Energiebilanz Deutschland 1990 bis 2014, 2015

⁸ Endbericht zum Projekt IC4-42/13, Potenzial- und Kosten-Nutzen-Analyse zu den Einsatzmöglichkeiten von Kraft-Wärme-Kopplung, B

duktionsmaschinen auf den Gesamtenergiebedarf von Produktionsgebäuden bewertet werden, sodass bereits im Planungsprozess die Gebäudehülle und die Gebäudetechnik besser auf die Belange der Produktionsprozesse abgestimmt werden kann. Das Fraunhofer-Institut für Bauphysik entwickelt derzeit in Zusammenarbeit mit weiteren Fraunhofer-Instituten ein solches Planungstool, in welchem prozessrelevante Parameter in die energetische Gesamtbilanz implementiert werden. Die Steigerung der Energieeffizienz von Produktionsgebäuden durch eine umfassende Planungsmethodik kann damit einen wichtigen Beitrag zur erfolgreichen Umsetzung der Energiewende leisten.

Auch wenn in diesem Beitrag nur eine kurze Übersicht über einzelne Möglichkeiten für eine nachhaltige und effiziente Wärmeversorgung der Industrie aufgezeigt werden konnte, zeichnet sich jedoch ab, dass in Zukunft nur die Kombination einer Vielzahl an Technologien und der Einsatz verschiedenster Ressourcen – so individuell wie die Industrie selbst – zum Ziel führen kann.

7 Zusammenfassung

Der Wärmebedarf der Industrie in Höhe von 534 TWh (Jahr 2012) wird hauptsächlich durch die Energieträger Erdgas und Kohle gedeckt. Dabei wurden rund 159 Mio. t CO₂ emittiert, was 48 % des Industriesektors (inkl. Strom und Prozessemissionen) entspricht.

Bei einer rein theoretischen Betrachtung geht derzeit knapp die Hälfte der eingesetzten Energie zur Wärmeerzeugung als Abwärme verloren, die bei vollständiger Nutzung bis zu 60 Mio. oder bei Verstromung bis zu 22 Mio. t CO₂ einsparen könnte. Um dieses Potenzial zu nutzen, bedarf es aber noch in vielen Fällen der Aufklärung der Akteure über ihre eigenen Abwärmepotenziale sowie die Anpassung der Rahmenbedingungen (z. B. KWKG, EnEG, EEWärmeG) für die Schaffung von Anreizen und Wirtschaftlichkeit. Auch bedarf es generell noch viel F&E, wie am Beispiel der energieintensiven Industrie in NRW gezeigt werden konnte, um aus heutiger Sicht die Klimaziele der Bundesregierung bis 2050 zu erreichen. Vor allem sind Lösungen zu finden, damit der Standort Deutschland für die energie- und emissionsintensive Industrie nicht an Attraktivität verliert. Die Wärmebereitstellung über Solarthermie sowie der verstärkte Einsatz von Biomasse und KWK sind dabei gute Beispiele, wie die Wärmebereitstellung für die Industrie in Zukunft effizient und umweltfreundlich gestaltet werden kann. Auch Wärmespeicher, die sowohl zeit- als auch ortsunabhängig agieren, werden in Zukunft dazu beitragen können, besser Abwärme zu nutzen. Ebenso können Wärmespeicher fluktuierende Wärme z. B. aus Solarthermie speichern und zu gegebenen Zeitpunkten freigeben. Auch emissionsoptimierte Produktionsstätten, die gezielt die Abwärme aus Prozessen an geeigneter Stelle nutzen, weisen Wege für einen verantwortungsbewussten Umgang mit Rohstoffen auf.

Wärmewende im Quartier



Fraunhofer IBP
Dr. Dietrich Schmidt
dietrich.schmidt@ibp.fraunhofer.de

Heike Erhorn-Kluttig
heike.erhorn-kluttig@ibp.fraunhofer.de

Wuppertal Institut
Dr. Johannes Venjakob
johannes.venjakob@wuppertalinst.org

IZES
Bernhard Wern
wern@izes.de

ZSW
Dr. Jann Binder
jann.binder@zsw-bw.de

DLR
Evelyn Sperber
evelyn.sperber@dlr.de

Fraunhofer ISE
Gerhard Stryi-Hipp
gerhard.stryi-hipp@ise.fraunhofer.de

Fraunhofer IWES
Britta Zimmermann
britta.zimmermann@iwes.fraunhofer.de

DBFZ
Dr. Volker Lenz
volker.lenz@dbfz.de

Bedeutung des Gebäudesektors

Auf den Gebäudebereich als einen der großen Energieverbrauchssektoren entfallen knapp 40 % des Endenergieverbrauchs in Deutschland und damit auch gut ein Drittel aller anfallenden bundesweiten CO₂-Emissionen.

Anders als im Stromsektor ist der Beitrag der erneuerbaren Energien für die Wärmebereitstellung in den vergangenen Jahren nur wenig gewachsen. Es ist unter den jetzigen finanziellen und rechtlichen Rahmenbedingungen zu erwarten, dass sich dieser Trend auch in den kommenden Jahrzehnten ähnlich fortsetzt; die Integration von erneuerbaren Energien im Wärmebereich also langsamer als im Strombereich voranschreitet.

Weiterhin weist der Gebäudebereich derzeit nur eine geringe Sanierungsrate von jährlich etwa einem Prozent des Bestandes auf, was rein zahlenmäßig in etwa die Abbruchrate von Gebäuden ausgleicht. Die energetische Sanierungsrate liegt in Deutschland sogar noch unter einem Prozent. Somit schlummern im Gebäudesektor noch enorme Effizienzpotenziale.

Abwärme und Wärme aus niederkalorischen erneuerbaren Energiequellen (Umgebungswärme, Solarthermie) eignet sich besonders gut zur Deckung der Wärmebedarfe in privaten Haushalten. Diese bewegen sich auf einem relativ geringen Temperaturniveau mit ca. 21 °C für die Raumwärme und mit ca. 45 °C für die Trinkwarmwassernutzung. Außerdem hat der Wärmebedarf privater Haushalte den weitaus größten Anteil an den Verbräuchen.

Systemische Lösungen auf Quartiersebene

Für die Erschließung dieser Quellen ist das Quartier oder der Stadtteil häufig der angemessene Maßstab. Hier ließe sich der Anteil der erneuerbaren Energien auch in der Wärmeversorgung deutlich steigern.

Die benötigten Technologien sind überwiegend vorhanden. Für eine zukunftsweisende und innovative Energieversorgung auf Quartiersebene müssen die Versorgungsseite und die Energieanwender stärker als integrale Systeme betrachtet und entsprechende Geschäftsmodelle für den Betrieb der Anlagen erarbeitet werden.

Für eine optimierte Nutzung von vorhandenen Wärmepotenzialen in Städten und Quartieren empfehlen sich auf den verschiedenen Maßstabsebenen unterschiedliche Lösungen:

Auf der Ebene der Einzelgebäude zielen vor allem bedarfssenkende Maßnahmen (z. B. Wärmedämmung) in Kombination mit der Optimierung der möglichen Flächen für die Nutzung von PV- und solarthermischen Anlagen auf eine optimierte Eigenstrom- bzw. Eigenwärmenutzung.

Auf der Quartiersebene steht eine deutlich größere Zahl von technologischen und ökonomisch effizienteren Lösungen zur Verfügung. So kann beispielsweise über Wärmenetze eine verbesserte Ausnutzung der verschiedenen Wärmepotenziale im Verbund durch Installation mehrerer Technologien zur Wärmebereitstellung (Solarthermie, Geothermie, Blockheizkraftwerk, Spitzenlastkessel, ...) und deren Betrieb abhängig von der Angebots- und Bedarfsituation in den Domänen Strom und Wärme erreicht werden.

Zielsetzungen

Auf der Basis der zentralen Herausforderungen der Wärmewende, dass gerade Gebäude und damit Städte die Hauptverbraucher von Energie sind, dass neu zu erstellende Gebäude als Plus-Energie-Gebäude und damit als „kleine Kraftwerke“ gebaut werden sollen, dass die Sanierungsraten und die Effizienz der Energieumwandlung/-nutzung erhöht werden müssen und sich auch aus diesen Gründen neueste Entwicklungen zunehmend auf den Quartiersmaßstab fokussieren, lassen sich die gesteckten Ziele der Bundesregierung für den Wärmebedarf des Gebäudebestands wie folgt zusammenfassen:

- Reduzierung des Wärmebedarfs bis 2020 um 20 %
- Minderung des Primärenergiebedarfs bis 2050 um 80 %
- Verdoppelung der energetischen Sanierungsrate von derzeit etwa 1 % auf 2 %
- Nahezu klimaneutraler Gebäudebestand in 2050

Um diese Ziele erreichen zu können ist für die Wärmewende im Quartier eine Dreifachstrategie erforderlich (siehe [Abbildung 1](#)).

Wie sich diese Strategie angepasst an lokale Bedingungen umsetzen und verwirklichen lässt, zeigen die nachfolgenden Beispiele.

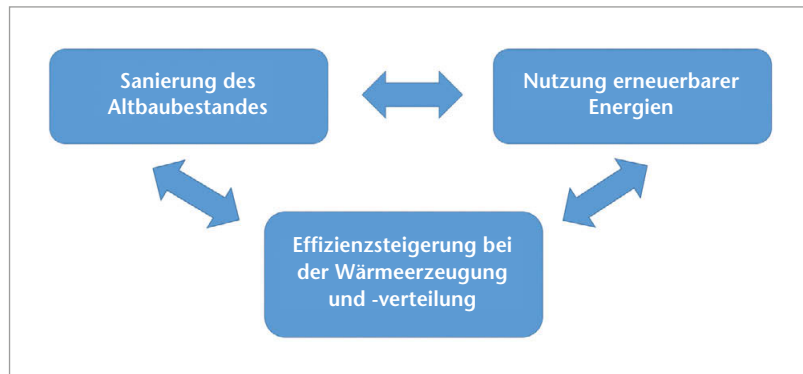


Abbildung 1
Dreifachstrategie
für eine Umsetzung
der Wärmewende im
Quartier

**Beispiel: Neubausiedlung Kassel
„Zum Feldlager“**

In attraktiver Wohnlage entsteht auf einer Fläche der Stadt Kassel ein zukunftsweisendes Baugebiet. Bei der Planung hatten Anforderungen an Städtebau, Klima- und Umweltschutz höchste Priorität. Innerhalb des 11,5 ha großen Bebauungsgebietes werden rund 120 Grundstücke mit rund 180 Wohneinheiten für ca. 400 Bewohner entstehen.

Das entwickelte Wärmeversorgungskonzept für die Siedlung verfolgt drei Ziele:

1. nachhaltige Nutzung von regenerativen Energiequellen
2. Minimierung des Primärenergiebedarfs und der CO₂-Emissionen
3. Vermeidung von Feinstaubemissionen vor Ort

Durch die Kombination von erprobten, untereinander vernetzten Einzelkomponenten aus Solarthermie, oberflächennaher Geothermie und Wärmepumpen ist ein innovatives Gesamtkonzept in enger Kooperation mit lokalen Entwicklungspartnern wie dem Institut für dezentrale Energietechnologien (IdE), der Universität Kassel, der Stadt Kassel, den Städtischen Werken Kassel und dem Fraunhofer IBP entstanden, das vom BMWi gefördert wird.

Das innovative Wärmeversorgungskonzept verknüpft zentrale und dezentrale Wärmeerzeugung. Die Versorgung der Einzelgebäude mit Raumwärme erfolgt über ein Nahwärmenetz, das zentral von einer Wärmepumpe mit Erdwärme gespeist wird.

Abweichend von einem typischen Fernwärmenetz mit Temperaturen zwischen 70 °C und 90 °C kommt das geplante Nahwärmenetz mit einem Niveau von ca. 40 °C aus. Dies reicht für eine verlustarme Versorgung von Flächenheizungen aus und erlaubt eine hocheffiziente Bereitstellung von regenerativer Wärme unter Einsatz einer zentralen Wärmepumpe. Gleichzeitig senkt diese Maßnahme die Wärmeverluste im Netz auf ein Minimum und verursacht geringere Energiekosten. Die zentrale Wärmepumpe

arbeitet ebenfalls sehr effizient bei niedrigen Temperaturen von nur 40 °C. Das für die Trinkwarmwasserbereitung benötigte höhere Temperaturniveau von ca. 45 °C für Einfamilienhäuser und ca. 60 °C für Mehrfamilien- und Mietshäuser wird weitestgehend von dezentralen Einheiten bereitgestellt. Die Wärme kommt dabei zum größten Teil aus solaren Trinkwarmwasseranlagen, die auf den einzelnen Gebäuden vorgesehen sind. Erst bei Ausbleiben dieser solaren Wärme, z. B. in den Wintermonaten, sichert eine elektrische Nachheizung die Warmwasserbereitung.

Dem Erreich des Erdwärmefeldes wird im Sommer Solarwärme aus unabgedeckten Solarkollektoren sehr kostengünstig zur Regenerierung zugeführt. Mit diesem Konzept können rund zwei Drittel des Primärenergiebedarfs und der CO₂-Emissionen gegenüber einer Wärmeversorgung mit erdgasbetriebenen Brennwertkesseln eingespart werden.



Abbildung 2
**Städtebauliches
Konzept** für die
Neubausiedlung in
Kassel „Zum Feldlager“
© Stadt Kassel

Vor Ort entstehen keine Feinstaub- oder sonstige luftgetragene Emissionen, weil keine Verbrennung fossiler Energieträger erfolgt.

Für die ökonomische Betrachtung des geosolaren Nahwärmeversorgungskonzeptes wird als Referenzsystem ein dezentraler Gasbrennwertkessel mit Solarthermie zur Unterstützung der Trinkwarmwasserbereitstellung gegenübergestellt. Die Jahreswärmegestehungskosten setzen sich aus dem Grundpreis (Investitions-, Wartung- und Instandhaltungs-, Bedienungskosten) sowie aus den Energiekosten für den Betrieb der Anlage zusammen.

Der Kostenvergleich beider Systeme zeigt, dass die Jahreswärmegestehungskosten bei der zentralen innovativen Energieversorgungsvariante mit geosolarer Nahwärme im Vergleich zum Referenzsystem sogar geringer sind. Der Betrieb der zentralen Anlage hat höhere Erstinvestitionskosten, benötigt aber bedeutend weniger Energie, was zu (deutlich) geringeren Jahres-Energiekosten (Betriebskosten) führt. Damit unterbietet das geosolare Wärmeversorgungskonzept die Jahreswärmegestehungskosten des Referenzsystems um 5 %.

Der ökologische Vergleich der beiden Wärmeversorgungsvarianten zeigt die Vorteile der zentralen Wärmeversorgung noch deutlicher: Die Nutzung des Brennstoffs Gas in der Referenzvariante hat einen gut 60 % höheren Primärenergiebedarf und die damit verbundenen CO₂-Emissionen als das System mit geosolarer Nahwärme.

Beispiel: Energie-Plus-Siedlung in Wüstenrot

Mit steigender fluktuierender Energieerzeugung steigt der Bedarf an Möglichkeiten zur Zwischenspeicherung von elektrischer Energie. Eine Alternative zu großen Speichern stellt die aktive Nutzung der Speicherkapazitäten und variablen Lasten von Privathaushalten dar.

In der baden-württembergischen Gemeinde Wüstenrot entsteht derzeit eine Energie-Plus-Siedlung mit einem „kalten“ Nahwärmenetz. Dies wird von Erdwärmekollektoren, die auf einer Fläche von 1,5 Hektar unter Acker- und Wiesenflächen verlegt sind, gespeist. Wärmepumpen in den Haushalten bringen das je nach Jahreszeit 5 bis 15 °C kalte Wasser auf das zum Heizen nötige höhere Temperaturniveau. Der Bebauungsplan des Neubaugebiets schreibt für jedes Haus eine PV-Anlage vor.

Je nach Akteur ergeben sich verschiedene Optimierungsstrategien für den Betrieb der Wärmepumpe und der elektrischen Speicher:

- Der Eigentümer der PV-Anlage will den Eigenverbrauch optimieren.

- Der Netzbetreiber will die Spitzeneinspeisung aus den PV-Anlagen je nach Netzbelastung begrenzen.
- Der Lieferant der elektrischen Energie strebt an, die Wärmepumpen abhängig vom Börsenpreis der elektrischen Energie oder dem aktuellen Stromangebot aus Windkraftanlagen zu betreiben.

Im Projekt werden die verschiedenen Optimierungsstrategien verglichen. Es zeigt sich, dass Betriebsweisen von Wärmepumpen und Speichern möglich sind, die allen Akteuren Vorteile bieten und so dem privaten Investor entgegenkommen, das Netz entlasten und der fluktuierenden Erzeugung bis zu einem gewissen Grad folgen.

An dem Vorhaben beteiligt sind unter der Leitung der Hochschule für Technik Stuttgart u. a. die Firmen ads-tec, Dispatch EnergyLiacon-Batteries, Doppelacker, und der Versorger Vattenfall, sowie das Zentrum für Sonnenergie- und Wasserstoff-Forschung (ZSW) und das ifk der Universität Stuttgart. Das Projekt wird mit großer Unterstützung der Gemeinde Wüstenrot und Förderung des BMWi durchgeführt. Information und aktive Beteiligung sind entscheidende Bausteine für die Bereitschaft der Bürger, die erhöhten Anfangsinvestitionen für Technologien zu erbringen, die im Betrieb an die fluktuierende Erzeugung aus Sonne und Wind angepasst werden können. Geeignete Tarifstrukturen sind für die Amortisation der erhöhten Anfangsinvestition erforderlich.

Systemische Ansätze für die Wärmewende im Quartier

Wie die oben beschriebenen und weitere Beispiele zeigen, sind ganzheitliche Energiekonzepte für eine effiziente und nachhaltige Quartiers-Wärmeversorgung zwingend erforderlich.

Dabei sollte besonders der Strom-Wärme-Kopplung mehr Aufmerksamkeit geschenkt werden. Durch eine intelligente Steuerung von Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen oder strombetriebenen Wärmeerzeugern, insbesondere Wärmepumpen, ist es möglich, mittelfristig größere Anteile von erneuerbaren Energien in eine zukünftige Wärmeversorgung für Gebäude effizient einzubinden.

In diesem Zusammenhang ist auch der Biomasse als leicht speicherfähigem Energieträger Aufmerksamkeit zu schenken. In Ergänzung und im Verbund der erneuerbaren Energieoptionen fungiert Biomasse als Lückenfüller und Versorgungsstabilisator sowohl im Strom- als auch im Wärmesektor mit vorhandenen und neu zu entwickelnden Brennstoff-Energieversorgungs-Pfaden. Reine Bioenergie-Quartiere oder Bioenergiegedörfer scheinen dagegen für die Zukunft nur sehr bedingt zielführend.

In der konkreten Planung treten oft Spannungsfelder für die Wahl von Technologieoptionen zutage. So stellt sich in frühen Projektphasen die Frage nach der Wahl der Wärmeversorgungstechnologie. Soll man eher auf eine zentrale Versorgung über ein effizient aber mit höheren Investitionskosten einhergehendes Wärmenetz setzen oder auf flexible Einzelheizungen? Inwieweit kann die lokale Erzeugung mit Hilfe von erneuerbaren Energien gesteigert werden oder soll man sich eher auf verbrauchsreduzierende Maßnahmen, wie Wärmedämmung, fokussieren? Ist es sinnvoller den Anteil der erneuerbaren Energien zu maximieren oder vermehrt auf Kraft-Wärme-Kopplungstechnologien setzen? Sind moderne sogenannte Power-to-Heat Anwendungen sinnvoll oder inwieweit kann es die direkte Wärmeerzeugung aus Strom sein?

Um diese Fragen für die beteiligten Akteure wie Energieversorger, Planer, Wohnbaugesellschaften und Hausbesitzer beantworten zu können, werden neue Bewertungsinstrumente benötigt. Hierbei liefern Werkzeuge mit einer zeitlich hochaufgelösten Modellierung des Strom-Wärme-Quartiersystems wertvolle Erkenntnisse. Aber auch einfachere Potenzialbewertungstools auf Basis von Typologiekennwerten sind besonders für die Entscheidungen im frühen Entwurfsprozess hilfreich. Weiterhin ist eine Entwicklung von Instrumenten für die ganzheitliche Bewertung von Quartiers-Energiesystemen nötig. Darüber hinaus schaffen gerade kommunale Wärmepläne die Grundlage für eine langfristig angelegte, zielgerichtete und kosteneffiziente Wärmeversorgung unter Berücksichtigung einer langfristigen Gebäudesanierungsstrategie, der lokalen Potenziale von zum Beispiel Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen, erneuerbaren Energien, Abwärme und der bestehenden Infrastrukturen. Dies soll möglichst unter Einbindung aller wesentlichen Akteure zur Verankerung einer nachhaltigen Energieversorgung als kommunale Daseinsvorsorge, zur optimalen Verzahnung von energetischer Gebäudesanierung und effizienter bzw. zweckmäßigster Restwärmeversorgung, zur Schaffung von Investitionssicherheit und langfristig kalkulierbaren Wärmekosten sowie zu einem koordinierten Ausbau bzw. Rückbau von Infrastrukturen führen.

Fazit

Zusammenfassend kann die Vielzahl der angesprochenen Aspekte für eine erfolgreiche Wärmewende im Quartier mit einigen Punkten beschrieben werden:

- Die größten Aufgaben und Herausforderungen liegen im Bestand. Unsere zukünftigen Städte und Quartiere existieren zumeist heute schon und haben teilweise einen recht großen Wärmebedarf.
- Gerade im Quartiersmaßstab lassen sich insbesondere Niedertemperaturwärmequellen effizient nutzen. Hierdurch können bisher ungenutzte Potenziale für eine zukünftige Wärmeversorgung erschlossen werden.
- Die Betrachtung des weiteren Ausbaus der erneuerbaren Energien muss Hand in Hand mit einer weiteren Effizienzsteigerung der Energienutzung erfolgen und beides muss zusammen betrachtet werden.
- Die sicherlich größten Herausforderungen stellen sich mit der Integration aller Teilsysteme in einem zukünftigen Energiesystem dar. Diese kann mittels Vernetzung der Einzeltechnologien und über moderne Planungswerkzeuge, wie beispielsweise kommunale Wärmepläne und Potenzialbewertungstools, vorangebracht werden.

Literatur

- Sager-Klauss C. (2015): Stadt der Zukunft – Auf dem Weg zur Morgenstadt. In: Immozeit, Heft 2, 24. Jahrgang. S. 16–19.
- Nitsch, J. et. al. (2012): Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global. Schlussbericht. Herausgeber: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU).
- Stadt Kassel (2015): Zum Feldlager – Planung einer zeitgemäßen Siedlung. Herausgeber: Kassel documenta Stadt, Dezernat Verkehr, Umwelt Stadtentwicklung und Bauen Stadtplanung, Bauaufsicht und Denkmalschutz, Abteilung Stadtplanung.
- Pietruschka, D., Kluge, J. (2013): Kalte Nahwärme: agrothermische Wärmeversorgung einer Plusenergiesiedlung, bbr (03-2013), S. 58–63
- BMWi-Forschungsinitiative Energieeffiziente Stadt (EnEff:Stadt): Website der Forschungsinitiative mit vielen Pilotprojekten und Technologien für energieeffiziente Quartiere. www.eneff-stadt.info
- Erhorn-Kluttig, H., Erhorn, H (2016): Energetische Bilanzierung von Quartieren. Ergebnisse und Benchmarks von Pilotprojekten – Forschung zur energieeffizienten Stadt. Schriftenreihe EnEff:Stadt. Fraunhofer IRB Verlag. ISBN 978-3-8167-9629-9.
- Erhorn-Kluttig, H. et. al. (2013): Der Energiekonzeptberater für Stadtquartiere. Ein Potenzialbewertungstool aus der Forschungsinitiative EnEff:Stadt. Schriftenreihe EnEff:Stadt. Fraunhofer IRB Verlag. ISBN 978-3-8167-9139-3.

Chancen und Potenziale innovativer Wärmedämmung



ZAE Bayern
Dr. Hans-Peter Ebert
hans-peter.ebert@zae-bayern.de

Fraunhofer ISE
Tilman Kuhn
tilmann.kuhn@ise.fraunhofer.de

Dr. Christoph Maurer
christoph.maurer@ise.fraunhofer.de

Fraunhofer IBP
Prof. Dr. Martin Krus
martin.krus@ibp.fraunhofer.de
Dr. Dietrich Schmidt
dietrich.schmidt@ibp.fraunhofer.de

Knapp 40% des Endenergiebedarfs in Deutschland entfallen auf den Gebäudebereich. Dieser Energieeinsatz ist mit einem Drittel aller anfallenden CO₂-Emissionen verbunden. Hier sind ausreichend wärmedämmte Hüllen eine Voraussetzung für die Realisierung von energieeffizienten Gebäuden.

In der Industrie spielen technische Wärmedämmungen eine herausragende Rolle, um industrielle Prozesse energie- und damit kosteneffizient zu gestalten. So zum Beispiel in der chemischen Industrie oder in der Metallproduktion und -verarbeitung.

Im Folgenden werden aus beiden Bereichen innovative Wärmedämmkonzepte vorgestellt und aktuelle Forschungs- und Entwicklungstrends beleuchtet.

Wärmedämmung für Gebäude

Ein wichtiger Ansatzpunkt für die Steigerung der Energieeffizienz im Gebäudebereich ist die Optimierung der Wärmedämmung der Gebäudehülle. Diese bestimmt maßgeblich den Energiebedarf eines Gebäudes. Mit innovativen Materialansätzen werden immer effizientere Wärmedämmungen realisiert, um den verbleibenden Aufwand für Heizung und Kühlung von Gebäuden zu reduzieren.

Effizient sollen diese Systeme dabei in mehrfacher Hinsicht sein: Sie weisen eine herausragend niedrige Wärmeleitfähigkeit auf. Gleichzeitig werden weniger wertvolle Rohstoffe benötigt, um Dämmsysteme mit ausreichenden Dämmeigenschaften zu produzieren.

Vakuumisolationspaneele

Beispiele für hochentwickelten evakuierten Wärmedämmsysteme sind u. a. Vakuumisolationspaneele (VIP) mit Wärmeleitfähigkeiten um die 0,005 W/(mK) oder nanostrukturierte Materialien, wie z. B. Aerogele oder sogenannte Nanoschäume, welche Wärmeleitfähigkeiten im Bereich von unter 0,02 W/(mK) aufweisen [1]. Zum Vergleich: die Wärmeleitfähigkeit von ruhender Luft beträgt 0,026 W/(mK) bei Raumtemperatur und Wärmeleitfähigkeitswerte von typischen Dämmstoffen bewegen sich im Bereich von 0,03 W/(mK) bis 0,04 W/(mK).

Bei VIPs wird ein poröses Kernmaterial soweit evakuiert und anschließend dauerhaft vakuumdicht verpackt, dass das verbleibende Restgas keinen Einfluss mehr auf die Wärmeleitfähigkeit hat.

Bei den nanostrukturierten Materialsystemen wird die Beweglichkeit der Gasmoleküle durch kleine Porenstrukturen verringert und damit der Wärmetransport über die Gasphase deutlich reduziert. Ein Vorteil dieser Hochleistungsdämmsysteme besteht darin, dass man mit sehr geringen Dämmstärken auskommt, um den erforderlichen Wärmeschutz zu realisieren. Damit sind diese Systeme immer dann besonders interessant, wenn Baugrund teuer ist, eigentlich kein Platz für eine nachträgliche Wärmedämmung vorhanden ist oder eine Architektur realisiert werden soll, die nicht durch dicke Wärmedämmschichten beeinträchtigt wird.

Abbildung 1 zeigt beispielsweise ein mit Vakuumisolationspaneelen energetisch saniertes Reihemittelhaus (Baujahr 1956). Der U-Wert der hier gezeigten Nordfassade konnte von ursprünglichen 1 W/(m²K) auf 0,15 W/(m²K) reduziert werden. Die entsprechende Thermografieaufnahme auf der rechten Bildhälfte zeigt deutlich die erniedrigten Außenwandtemperaturen (blaue Farben), die mit verminderten Wärmeverlusten einhergehen, gegenüber dem nicht sanierten linken Haus.

Schaltbare Wärmedämmung

Ein Forschungstrend ist im Bereich der adaptiven Gebäudekomponenten festzustellen, wie z. B. bei schaltbaren Wärmedämmungen (SWD). Eine am ZAE Bayern in Entwicklung befindliche schaltbare Wärmedämmung soll während Heizperioden auf die Wände fallende Solarstrahlung absorbieren und bei Bedarf in das Gebäudeinnere transportieren [2]. Das System besteht aus einem Dämmpaneel, dessen Wärmeleitfähigkeit elektrisch geschaltet werden kann: von hoch wärmeleitend bis hoch dämmend. Das Schalten der SWD beruht bisher auf dem Freisetzen einer geringen Menge an Wasserstoffgas durch Aufheizen eines Metallhydrids (MeH₂), das in das Dämmmaterial eingebracht ist. An das Metallhydrid lagert sich das Wasserstoffgas bei Abkühlung wieder reversibel an. Durch den freigesetzten Wasserstoff wird die Wärmeleitfähigkeit im Paneel bis um einen Faktor 50



Abbildung 1
Mit Vakuumsolationspaneelen energetisch saniertes Reihenmittelhaus

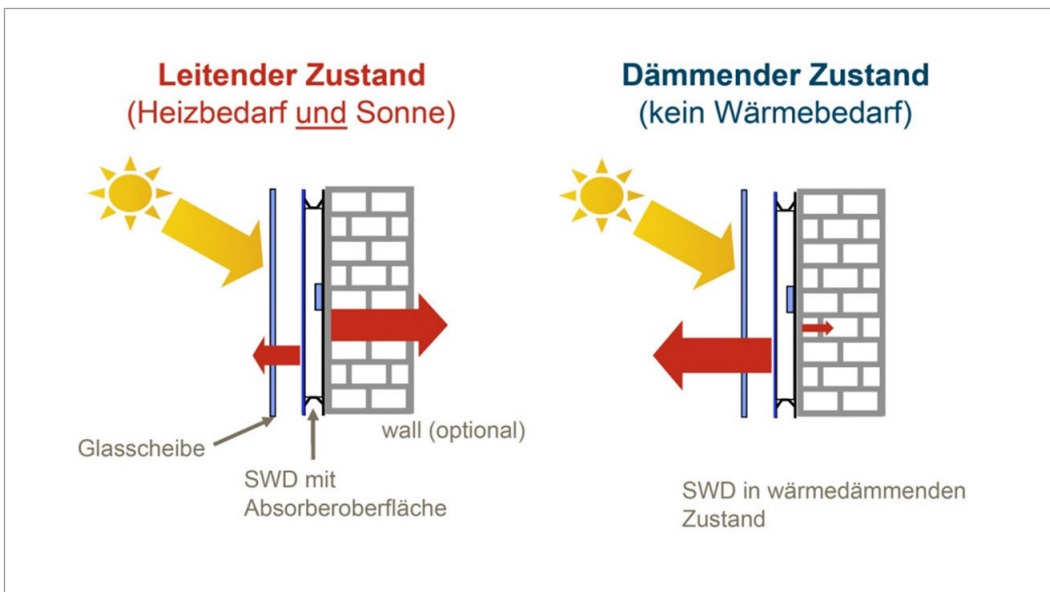


Abbildung 2
Funktionsprinzip der schaltbaren Wärmedämmung:
2a) wärmedämmend im Sommer, um Wärmeeinträge zu vermindern
2b) wärmeleitend im Winter, um zusätzliche Energieeinträge zu generieren

erhöht (Abbildung 2). Der Wärmedurchgangskoeffizient steigt dabei von z. B. rund $0,2 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ im dämmenden Zustand auf einen Wert von beispielsweise $10 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ im nicht-dämmenden Zustand an und liegt dann in der gleichen Größenordnung wie der Wärmeübergangskoeffizient von der Wand in den Raum. Für den Transport der Sonnenenergie ins Gebäude stellt dies somit keine Begrenzung mehr dar. Die elektrische Schaltleistung liegt dabei im Bereich weniger Watt pro Quadratmeter schaltbarer Wärmedämmung. Das Panel wird als Solarabsorber an die Hauswand angebracht. So wird sich beispielsweise an einem sonnigen Wintertag die Vorderseite des Panels erwärmen. Das Panel wird dann auf hoch wärmeleitend geschaltet und die Wärme wird über das Panel und den dahinter liegenden Wandaufbau (z. B. Mauerwerk) in das Gebäudeinnere transportiert und damit das Gebäudeheizungssystem unterstützt. In der Nacht, bei Bewölkung

oder im Sommer bleibt das Panel passiv im hoch dämmenden Zustand und das Gebäude ist sehr gut wärmegeklämt.

Integriertes Wärmemanagement-Fassadenelement

Ein anderer Ansatz wurde im Verbundprojekt WaMaFat (Integriertes Wärmemanagement-Fassadenelement) unter Beteiligung des Fraunhofer ISE realisiert. Gut gedämmte Gebäude haben einen geringeren Heizbedarf, aber unter Umständen einen erhöhten Kühlbedarf, besonders bei hohen internen Lasten. Deshalb kann es im Sommer sinnvoll sein, die Dämmung durch eine Konvektionsschicht, in der die Wärme abgeführt wird, zu überbrücken, um das Gebäude in der Nacht passiv auszukühlen (siehe *Abbildung 3*).

Abbildung 3
Konvektionsschicht zur Wärmeabfuhr:
Je nach der Höhe des realisierten Volumenstroms zwischen Außenwärmedämmung und Mauerwerk verändert sich der U-Wert der Wand.

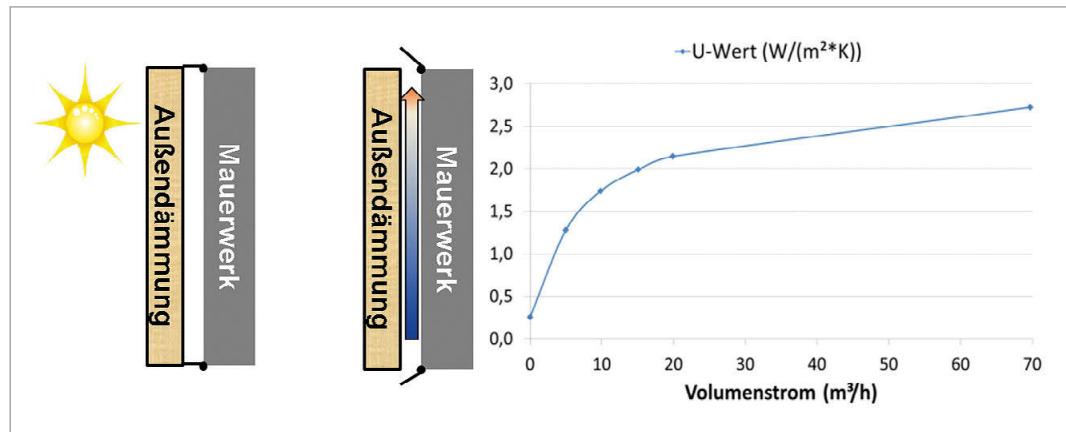
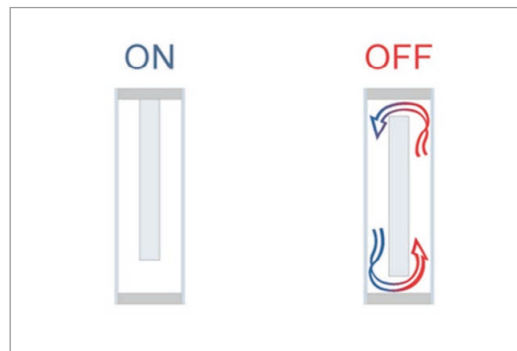


Abbildung 4
Element mit schaltbarem U-Wert:
Im ausgeschalteten Zustand ist die Wärmedämmung durch eine Konvektionsströmung stark reduziert.



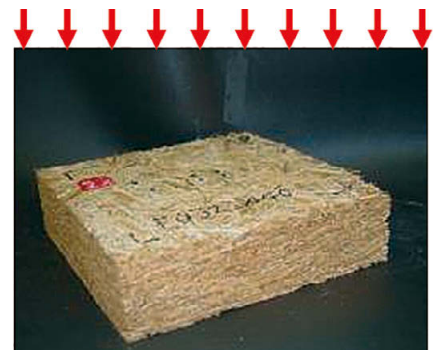
Im Projekt wurde dazu ein transluzentes Wandelement mit schaltbarem U-Wert entwickelt (siehe [Abbildung 4](#)). Dabei lässt sich ein transluzentes Dämmpaneel zwischen zwei Scheiben vertikal so bewegen, dass eine Konvektionswalze verhindert oder ausgebildet wird. Dieses Element kann im Brüstungsbereich eingesetzt werden und reduziert gleichzeitig den Kunstlichtbedarf. In den Prüfmustern ließ sich der U-Wert um einen Faktor 2 schalten, d. h., ohne Konvektion betrug der U-Wert 0,89 W/(m²K), mit Konvektion 1,71 W/(m²K). Damit einhergehend kann eine Kühllastreduktion um 10 % wie bei Nachtlü-

ftung, aber ohne Ventilatorenergie, erreicht werden. Würde man die Konvektion im Spalt durch einen Ventilator erzwingen, könnte man sogar eine Kühllastreduktion um 30% erreichen.

Nachhaltige Dämmstoffe

Das Fraunhofer Institut für Bauphysik hat in jüngster Zeit einen ökologisch nachhaltigen Dämmstoff auf der Basis von Rohrkolben (Typha) entwickelt ([Abbildung 5](#)). Durch die besonderen strukturellen Eigenschaften von Rohrkolben lassen sich Baustoffe erzeugen, die eine am Markt einmalige Kombination aus Tragwirkung und Dämmung bieten. Die besondere Eignung der Blattmasse von Typha für die Herstellung von innovativen Baustoffen ist bestimmt durch die Struktur der Pflanze [3]. Die Blätter sind durch die Kombination von zugfesten Längsfasern und elastischem Schwammgewebe auch in getrocknetem Zustand reiß- und bruchfest, flexibel und formstabil, was ihnen eine erstaunliche Statik und eine gute Dämmwirkung verleiht. Die entwickelte Wärmedämmplatte weist trotz relativ hoher Rohdichte von ca. 270 kg/m³ und einer hohen Festigkeit eine relativ niedrige Wärmeleitfähigkeit von 0,055 W/mK auf, ist kapillaraktiv und zeigt eine mittlere Diffusionsoffen-

Abbildung 5
Links: Rohrkolben (Typha)
Mitte: Anschnitt eines Blattes
Rechts: Magnesitgebundenes Typhaboard als Wärmedämmelement



heit, wodurch in vielen Anwendungsfällen auf den Einsatz einer Dampfbremse verzichtet werden kann. Dieser neue Baustoff bringt außerdem eine Reihe zusätzlicher positiver Eigenschaften mit:

- nachwachsender Baustoff
- hohe Schimmelpilzresistenz durch eigene Gerbstoffausrüstung
- guter Brand- und Schallschutz
- niedriger Energieaufwand bei der Produktion
- deutliche Umweltschutzevorteile beim Anbau
- Rückführbarkeit in den Stoffkreislauf

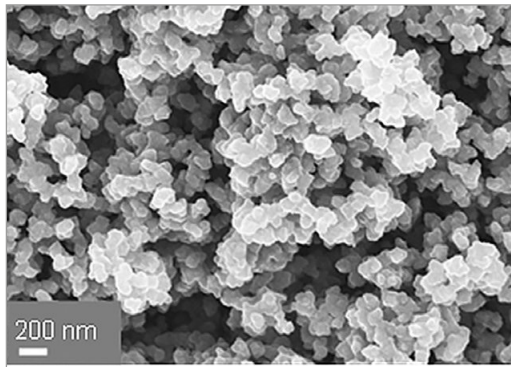


Abbildung 6
Kohlenstoff-Aerogele

Technische Wärmedämmungen

Knapp 80% der in Deutschland verwendeten Prozesswärme werden bei Temperaturen über 100°C benötigt, davon allein 70% über 250°C. Fast 40% des industriellen Energiebedarfs werden für den Betrieb von Industrieöfen benötigt. Diese müssen entsprechend effizient gedämmt werden.

Aerogele

Im Bereich der technischen Wärmedämmungen zielen aktuelle Forschungs- und Entwicklungsarbeiten am ZAE Bayern darauf ab, mit Hilfe von Nanomaterialien noch leistungsfähigere Dämmstoffe für unterschiedliche Anwendungsfelder zur Verfügung zu stellen. Besonders erfolgsversprechend sind hier die Kohlenstoff-Aerogele [4]. Diese Materialien bestehen

aus einem drei-dimensionalen Netzwerk von miteinander verketteten Kohlenstoffpartikeln (siehe *Abbildung 6*).

Die Porendimensionen, ebenso wie die Partikelgrößen, können maßgeschneidert in Größendimensionen von Nano- bis Mikrometer eingestellt werden. Dies geschieht durch die Wahl geeigneter Syntheseparameter bei der Herstellung dieser Materialien in einem nasschemischen Sol-Gel-Prozess. Hinsichtlich der Wärmedämmeigenschaften bei hohen Temperaturen sind Kohlenstoff-Aerogele unschlagbar. Gerade bei hohen Temperaturen zeigt das Kohlenstoff-Aerogel eine um den Faktor 4 bis 5 geringere Wärmeleitfähigkeit als derzeit eingesetzte Hochtemperatur-Wärmedämmstoffe (siehe *Abbildung 7*).

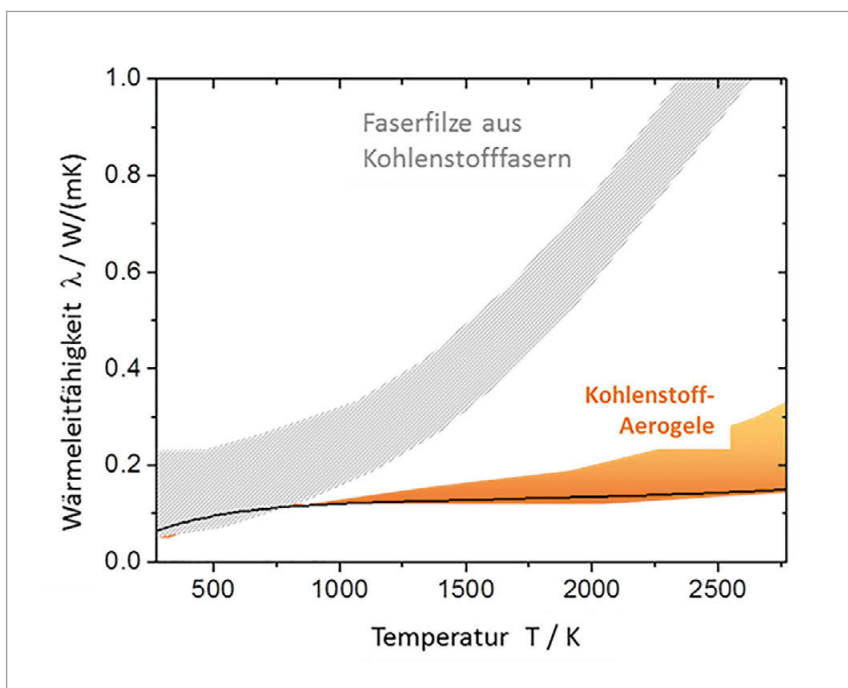


Abbildung 7
Wärmeleitfähigkeit von Kohlenstoff-Aerogel (schwarze Linie, der orange Bereich gibt die Unsicherheit der Werte an) im Vergleich zu Faserfilzen (grau schraffierter Bereich)

Fazit

Es existiert eine Vielzahl innovativer Lösungen für Wärmedämmungen mit herausragenden thermischen Eigenschaften. Neue Entwicklungen zielen darauf ab, multifunktionale Dämmsysteme zu realisieren, die z. B. schaltbar sind oder neben der reinen Wärmedämmfunktion noch zusätzliche gewünschte Materialeigenschaften besitzen. Noch sind wir leider nicht im Zeitalter angelangt, in dem wir Energie aus erneuerbaren Energiequellen im Überfluss zur Verfügung haben. Bis dahin können Wärmedämmungen Wärmeverluste reduzieren und den von unserer Gesellschaft benötigten Energiebedarf sowie den damit verbundenen CO₂-Ausstoß senken helfen.

Literatur

- [1] Ebert H.-P.: High Performance Insulation Materials in Springer Book Nearly Zero Energy Building Refurbishment, eds. Fernando Pacheco Torgal, Marina Mistretta, Arturas Kaklauskas, Claes G. Granqvist, Luisa F. Cabeza, Springer Series Advances in Sol-Gel Derived Materials and Technologies. 1st Edition., ISBN: 978-1-4471-5522-5 (2013)
- [2] Ebert H.-P., Stark C., Römer C., Wachtel J, Reim M., Vidi S., Scherdel C., Körner W., Weinländer H., Balzer C., Reichenauer G. und Manara J.: Materialien und Komponenten zur energetischen Optimierung von Feuchte, Licht und Wärme in Gebäuden, Tagungsband EnOB Symposium 2014 Energieinnovationen in Neubau und Sanierung, Hrsg. Projektträger Jülich, 2014
- [3] Krus M., Theuerkorn W., Großkinsky T., Georgiev G.: Neuer tragfähiger und dämmender Baustoff aus Rohrkolben, greenbuilding S. 44–47, 07-08, 2013
- [4] Reichenauer G., Ebert H.-P.: Sol-Gel Derived Porous Materials in NanoS, 01.08, 17-23, Wiley-VCH Verlag Weinheim, ISSN: 1614-7847 (2008)

Thermische Energiespeicher als sektorenübergreifende Querschnittstechnologie

Der Beitrag thermischer Energiespeicher zur Energiewende

Zum Gelingen der Energiewende sind eine deutliche Erhöhung des Anteils erneuerbarer Energien sowie eine effizientere Nutzung der Energie notwendig, damit die von der Bundesregierung im Energiekonzept formulierten Ziele erreicht werden können. Thermische Energiespeicher können hier als sektorenübergreifende Querschnittstechnologie auf drei Ebenen Beiträge leisten:

1. Sie dienen der **Speicherung von solar erzeugter Wärme**. Diese wird im Gebäudebereich mittels Solarkollektoren auf niedrigem Temperaturniveau für die Raumheizung und zur Bereitstellung von Warmwasser erzeugt. Dezentrale Wasserspeicher für einzelne Gebäude dienen dem Ausgleich kurzzeitiger Fluktuationen und in begrenztem Umfang der Langzeitspeicherung. Für Quartiere werden große Speicher, in denen ebenfalls Wasser oder das Erdreich als kostengünstiges Speichermedium genutzt wird, auch heute schon für den Ausgleich saisonaler Schwankungen und damit zur Erhöhung des solaren Deckungsanteils eingesetzt. Für die solarthermische Stromerzeugung mittels konzentrierender Spiegelsysteme sind Wärmespeicher auf Flüssigsalzbasis in kommerziellen Anlagen in Südspanien und den USA im Einsatz. Viele tausend Tonnen Speichermedium nehmen hier die solar erzeugte Hochtemperaturwärme auf, um sie in den Abendstunden dem konventionellen Kraftwerksteil wieder für die Stromerzeugung zur Verfügung zu stellen und damit regelbaren erneuerbaren Strom ins Netz zu speisen.
2. Die vermehrte Nutzung erneuerbaren Stroms erfordert die **Flexibilisierung** herkömmlicher Prozesse. Dies trifft auf konventionelle Kohlekraftwerke ebenso zu wie auf effiziente Kraft-Wärmegekoppelte Kraftwerke, in denen Wärmespeicher einen strom- oder netzgeführten Betrieb ermöglichen können. Druckluftspeicherkraftwerke können bei adiabater Fahrweise durch Integration eines thermischen Energiespeichers stundenweise zur effizienten Stromspeicherung genutzt werden. Zunehmende Bedeutung wird zukünftig auch sogenannten Power-to-Heat-Konzepten zuge-

schrieben, in denen fluktuierend anfallender Strom in Wärme umgewandelt wird. Im Nieder-temperaturbereich kann hierbei sehr kostengünstig negative Regelenergie bereitgestellt werden. Aber auch Anwendungen im Hochtemperaturbereich zur speichergestützten Hybridisierung bisher gasbefuerter Thermoprozesse in der Industrie werden an Bedeutung gewinnen.

3. Ein dritter Einsatzbereich thermischer Energiespeicher ist die **Effizienzsteigerung industrieller Prozesse** durch die Nutzung fluktuierend anfallender Abwärme. Einem klassischen Anwendungsfall stellen Batchprozesse der energieintensiven Industrien wie der Metall- oder Glaserzeugung oder -verarbeitung dar. Basierend auf einer genauen Prozessanalyse können thermische Energiespeicher eine Re-Integration der Wärme in den Prozess ermöglichen oder zur kontinuierlichen Erzeugung von Strom oder Kälte beitragen. So vielfältig die industriellen Prozesse in Bezug auf Wärmeträgerfluide, Temperaturniveau, Leistungsniveau und Speicherkapazität sind, so divers sind die Anforderungen an die dafür notwendigen thermischen Speichertechnologien.

Im erstgenannten Bereich der Speicherung solarthermisch erzeugter Wärme haben sensible thermische Energiespeicher teilweise bereits ihren Weg in die Anwendung gefunden und sind kommerziell verfügbar. Im Bereich der Kraftwerkstechnik und in der industriellen Prozesstechnik stehen erste technologische Lösungen im Hochtemperaturbereich zur Verfügung und werden in Pilotprojekten gemeinsam mit der Industrie im Anwendungsumfeld getestet. Bis auf ganz wenige Beispiele sind kommerzielle Produkte hier jedoch noch nicht am Markt. Der Weg bis zum Einsatz thermischer Energiespeicher als standardisierte, kostenoptimierte Komponente, die von Anfang an in der Planung verfahrenstechnischer Prozesse mit berücksichtigt werden kann, ist noch weit.



DLR

Dr. Antje Wörner
antje.woerner@dlr.de

Fraunhofer ISE

Dr. Thomas Fluri
thomas.fluri@ise.fraunhofer.de

Stefan Gschwander
stefan.gschwander@ise.fraunhofer.de

ISFH

Jan Steinweg
steinweg@isfh.de

GFZ

Stefan Kranz
stefan.kranz@gfz-potsdam.de

ZAE Bayern

Dr. Stefan Hiebler
hiebler@muc.zae-bayern.de

Das „Entwicklungsdreieck“ thermischer Energiespeicher

Es kann zwischen drei grundlegenden Arten thermischer Energiespeicherung unterschieden werden:

(1) **Sensible Speicher** nehmen Wärme mittels einer Temperaturänderung des meist flüssigen oder festen Speichermaterials auf. Die Speicherkapazität hängt damit von der Wärmekapazität des Materials, dessen Masse und der nutzbaren Temperaturdifferenz ab.

(2) Durchläuft das Speichermaterial einen Phasenwechsel – meist von fest nach flüssig – so spricht man von **Latentwärmespeichern**. Damit kann eine größere Wärmemenge auf dem konstanten Temperaturniveau des Phasenwechsels zur Verfügung gestellt werden.

(3) **Thermochemische Speicher** nutzen die Enthalpieänderung einer physikalischen Umwandlung (Sorption) oder einer chemischen Reaktion zur Speicherung. Die Energie kann dadurch beliebig lange verlustfrei gespeichert und bei Bedarf auf einem anderen (evtl. auch höheren) Temperaturniveau wieder freigesetzt werden.

- Aus dem Prozess lassen sich die Anforderungen an einen thermischen Energiespeicher in Bezug auf Wärmeträgerfluid, Temperaturniveau, Be- und Entladecharakteristik, Zyklenzahl und Speicherdauer ableiten. Die thermische und bei thermochemischen Speichern auch stoffliche **Integration des Speichers in den Prozess** ist von

Beginn der Entwicklung an zu berücksichtigen, um maximale Funktionalität und besten Nutzen zu erreichen.

- Maßgeblich bestimmend für die Eigenschaften des thermischen Energiespeichers ist das verwendete **Speichermaterial**. Physikalische, chemische oder thermodynamische Eigenschaften bestimmen die maximal erreichbare Speicherdichte und die im Speicher realisierbaren Funktionalitäten. Hohe Zyklenstabilität ist eine wesentliche Voraussetzung. Je weniger Zyklen ein Speicher im Prozess durchläuft – je größer also die Speicherdauer ist – desto weniger kostenintensiv darf das Speichermaterial sein.
- Durch das **Speicherkonzept** wird die Leistung des Speichers in Bezug auf die zu übertragende Wärmemenge bestimmt. Das Wärmeträgerfluid kann dabei direkt durch das Speichermaterial geleitet werden oder aber die Wärme über einen Wärmeübertrager indirekt eingekoppelt werden. Das Speicherdesign gewährleistet das gewünschte thermische Verhalten des Speichers und erfüllt die jeweils spezifischen Prozessanforderungen. Im Rahmen des Entwicklungsprozesses funktionsoptimierter und kostengünstiger Speicherlösungen müssen diese drei Eckpfeiler permanent im Austausch stehen.

Saisonale Speicherung

Der saisonalen Wärmespeicherung im Niedertemperaturbereich kommt große Bedeutung zu, soll die Bereitstellung von Raumwärme und Warmwasser im

Abbildung 1
Entwicklungsdreieck
thermischer
Energiespeicher



Wesentlichen aus regenerativen Quellen erfolgen. Technische Lösungen existieren in Form großer Behälter- oder Erdbecken- sowie Erdsondenspeicher, die in Pilotprojekten in Deutschland und Dänemark zur Wärmeversorgung von Quartieren mittels Nahwärmenetzen seit den 1990er Jahren eingesetzt werden. Ein hohes Verhältnis von Volumen zu Oberfläche reduziert Verluste und ermöglicht vergleichsweise niedrige Speicherkosten.

Das ZAE hat in einem Pilotspeicher, der in Attenkirchen seit 2002 in Betrieb ist, die Vorteile beider Speicher kombiniert (*Abbildung 2*): Ein 500 m³ großer Erdbeckenspeicher ist dabei von 90 Erdsonden mit einer Tiefe von 30 m umgeben. Die gesamte Speicherkapazität beträgt 165 MWh. Der Speicher wird über ein Kollektorfeld beladen und mittels Wärmepumpe entladen. Der träge Erdsondenspeicher wird dabei zur Langzeitspeicherung genutzt, während der Wasserspeicher zur Leistungsanpassung dient. Verluste aus dem Wasserspeicher werden vom umgebenden Erdreich aufgenommen und können über den Wärmeübertrager des Erdsondenspeichers genutzt werden.

Demgegenüber nutzen Aquiferspeicher abgeschlossene unterirdische Wasserreservoirs und tauschen zur Be- und Entladung Wärme über einen Wärmeübertrager zwischen einem sogenannten kalten und einem warmen Brunnen aus.

Vom GFZ wird seit Anfang 2016 eine Erkundungsbohrung in Berlin Charlottenburg bis in eine Tiefe von 530 Metern, also bis weit unter die Trinkwasserschichten, durchgeführt. Gesteinsproben und Bohrkern werden wissenschaftlich im Labor untersucht, um Betriebssicherheit und Grundwasserschutz zu gewährleisten. Mit verlässlichen Nutzungskonzepten wollen die Forscher zum Ausbau dieser umweltfreundlichen Technologie zur Bereitstellung der Wärmeversorgung insbesondere in Quartieren oder Ballungsräumen beitragen.

Einen alternativen Ansatz zum kurzfristigen Ausgleich von Fluktuationen in der Solareinspeisung verfolgt das ISFH. Dort werden in einer sogenannten Bauteilaktivierung Teile des Gebäudes – hier z. B. die Betondecken – als Wärmespeicher eingesetzt. Damit wurde in einem seit Anfang 2015 betriebenen Experimentalgebäude das Volumen des Wasser-Pufferspeichers auf 1.000 Liter reduziert und gleichzeitig der Solarertrag sowie der solare Deckungsanteil erhöht. Eine Simulationsstudie am ISFH zeigt, dass in Bestandsgebäuden auch über vorhandene Radiatoren, Fußboden- oder Wandheizungen die Gebäudemasse als Speicher aktiviert werden kann. Das Prinzip der Nutzung vorhandener Speichermassen



Abbildung 2
Erdbeckenspeicher
des Projekts
„Solare Nahwärme
Attenkirchen“

kann auch auf andere volatile regenerative Quellen (z. B. Wind- oder Sonnenstrom mit Wärmepumpe) angewandt werden. Damit kann ein erhebliches Lastverschiebungspotenzial über einen Zeitraum von vielen Stunden bis einigen Tagen kostengünstig und aufgrund des niedrigen Temperaturniveaus mit geringen Verlusten erschlossen werden.

Hochtemperatur-Speicher für industrielle Prozesse und die Kraftwerkstechnik

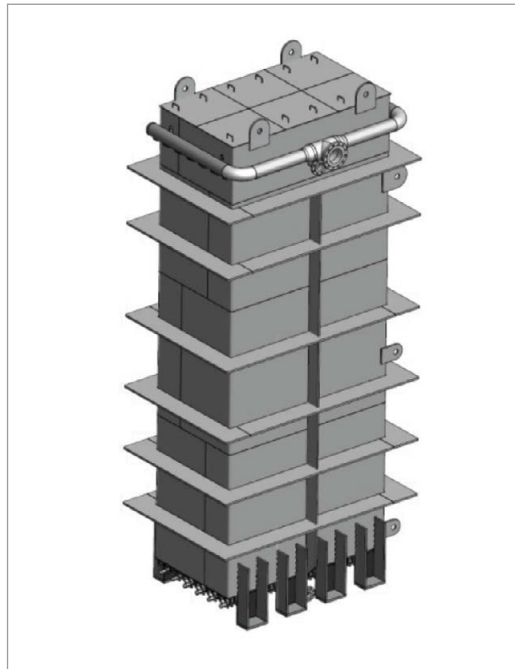
Im Hochtemperaturbereich sind nur ganz wenige Speicher im industriellen Einsatz: zum Beispiel Cowper-Speicher in der Stahlindustrie oder Ruths-Speicher für Dampf.

Eine effiziente Möglichkeit zur Dampfspeicherung besteht in der Nutzung von Latentwärmespeichern. Hier hat das DLR über Jahre hinweg ein Speicherkonzept mit berippten Rohren entwickelt (*Abbildung 3*). In den Druck beaufschlagten Rohren verdampft/kondensiert das Wärmeträgermedium (Wasser), während sich das als Phasenwechselmaterial eingesetzte Salz im Speichervolumen um die Rohre



Abbildung 3
Beripptes Rohr für den
Testspeicher

Abbildung 4
Schematische Darstellung des Latentwärmespeichers (6 MW, 1.5 MWh), der am Heizkraftwerk der STEAG in Wellesweiler in den Anlagenbetrieb integriert werden wird



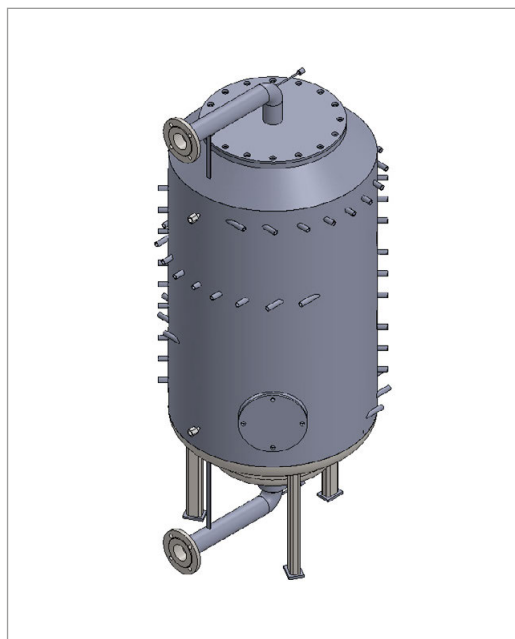
befindet. Zur Verbesserung der Wärmeleitfähigkeit werden die Rohre mit speziell entwickelten extrudierten Rippen bestückt. Nachdem der weltgrößte Latentwärmespeicher mit einer Kapazität von 700 kWh 2011 erfolgreich in einem Dampfkraftwerk in Carboneras getestet wurde, befindet sich momentan ein Speicher zur Dampfbesicherung eines an ein Heizkraftwerk angeschlossenen industriellen Prozesses im Aufbau. Mit 850 Einzelrohren hat dieser eine Leistung von 6 MW, die er über einen Zeitraum von 15 Minuten abgibt. Damit kann ein Ersatz-Dampfkessel abgeschaltet werden, der bisher dauerhaft im Standby-Modus betrieben wird. Der Speicher wird im laufenden Betrieb in die Anlage integriert und danach getestet werden (Abbildung 4).

Ein weiteres Anwendungsbeispiel aus dem industriellen Umfeld ist die Nutzung der Abwärme eines Gießereiofens während dessen Stillstandszeiten zur Bereitstellung von Prozess- und Heizwärme sowie von Prozesskälte. Hier entwickelt das ZAE Bayern für die Gießerei Heunisch zusammen mit dem Anlagenbauer Küttner einen Hochtemperaturwärmespeicher, der in Verbindung mit einer Absorptionswärmepumpe eingesetzt wird (Abbildung 5). Dieser wird als druckloser Zweistoffspeicher für Einsatztemperaturen bis 300 °C ausgeführt (Abbildung 6). Ein kostengünstiges Feststoffspeichermaterial wird von einem flüssigen Wärmeträgerfluid (Thermoöl) durchströmt. Die Wärme kann im Direktkontakt ausgetauscht werden. Nach einer Erprobungsphase im Labor soll das Speichermodul im realen Betrieb getestet werden. Durch die Anlage zum Abwärmerecycling sollen bei der Gießerei Heunisch jährlich etwa 3000 MWh Primärenergie und 600 t CO₂ eingespart werden.

Abbildung 5
Hochtemperatur-Abwärmequelle der Gießerei Heunisch



Abbildung 6
Zweistoffspeicher (schematische Darstellung)



Ein noch weiter in der Zukunft liegendes Ziel in der Entwicklung thermischer Energiespeicher für industrielle Anwendungen ist die Entkopplung von Leistung und Kapazität durch die Bewegung des Speichermaterials. Damit muss der eigentliche Speicher nur die notwendige Leistung zur Be- und Entladung bereitstellen können. Die Bevorratung des Speichermaterials im be- bzw. entladenen Zustand kann in beliebig großen, kostengünstigen Speicherbehältern erfolgen.

Beim Fraunhofer ISE werden derartige Ansätze in Form von Schneckenwärmeübertragern für Salz als Latentwärmespeichermaterial untersucht (Abbildung 7). Ein erster Funktionsnachweis im Labor konnte erbracht werden. Am DLR wird die thermochemische Wärmespeicherung mit Kalk für Temperaturen bis 600 °C in einem Wanderbettreaktor untersucht und wurde erstmalig im 10 kW-Maßstab erfolgreich im Laborreaktor nachgewiesen (Abbildung 8).

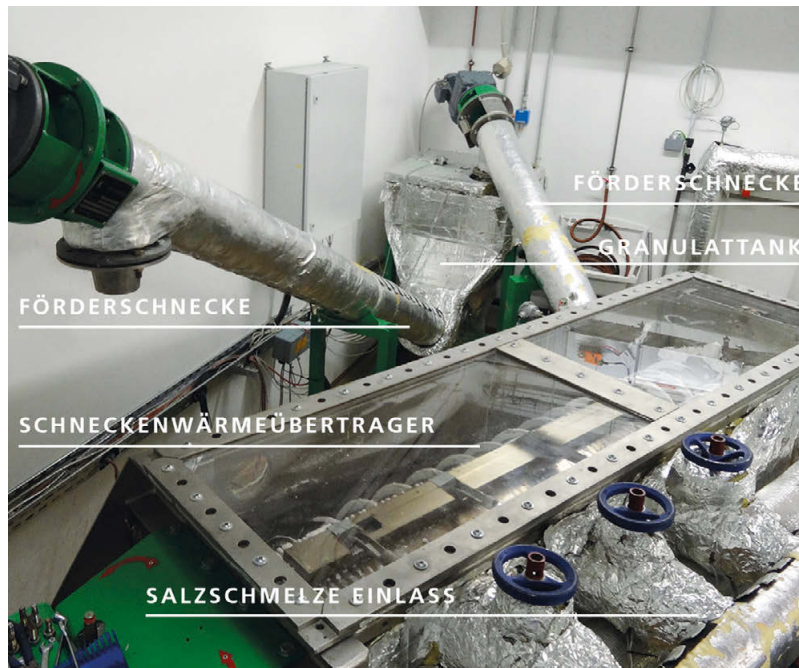


Abbildung 7
Schneckewärmeübertrager
zur Latentwärmespeicherung
(Fraunhofer ISE)

Zusammenfassung

Vielfältige thermische Energiespeichertechnologien stehen für einen breiten, branchenübergreifenden Einsatz in der Industrie und für die Speicherung von solar erzeugter Wärme zur Verfügung. Für die Lösung der noch offenen wissenschaftlichen Fragestellungen ist die interdisziplinäre Zusammenarbeit von Materialforschern und Ingenieuren notwendig. Gleichzeitig müssen die Endnutzer der Technologie von Anfang an eingebunden werden, um spezifisch angepasste Lösungen zu erarbeiten.

Für die saisonale Speicherung regenerativ erzeugter Niedertemperaturwärme im Gebäudebereich wurden bereits kostengünstige Speicherlösungen in Pilotprojekten zur Versorgung von Quartieren mit Nahwärme umgesetzt. Hier besteht der Forschungsbedarf im Wesentlichen in der Entwicklung standardisierter Planungs- und Bautechniken sowie in der Qualitätssicherung. Neuartige Ansätze zielen auf den Einsatz thermochemischer Systeme zur Langzeitspeicherung mit hoher Energiespeicherdichte.

Im industriellen Hochtemperaturbereich zeigt sich ein sehr diversifiziertes Bild in Bezug auf die Anforderungen an thermische Energiespeicher. Aktuell werden im Rahmen BMWi-geförderter Projekte Speicher für einen Einsatz im Temperaturbereich von 300 bis 350 °C auf Basis von Latentwärme sowie sensiblen Zweistoffsystemen (Fest – Flüssig) in Zusammen-

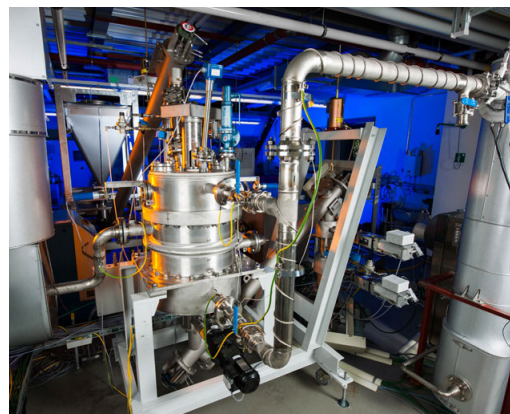


Abbildung 8
Wanderbettreaktor
zur thermochemischen
Wärmespeicherung
mit Kalk
(DLR)

arbeit mit der Industrie entwickelt und im Anwendungsumfeld getestet. Die Realisierung derartiger Demonstrationsspeicher und deren Einsatz im industriellen Umfeld ist ein wichtiger Schritt in der Kommerzialisierung thermischer Speicher.

Neuere Ansätze zur Entkopplung von Leistung und Kapazität befinden sich noch in einem frühen Stadium der Entwicklung und werden im Labormaßstab untersucht.

Wärmepumpen im zukünftigen Strom- und Wärmesektor



Fraunhofer ISE

Dr. Marek Miara
marek.miara@ise.fraunhofer.de

Thore Oltersdorf
thore.oldersdorf@ise.fraunhofer.de

Constanze Bongs
constanze.bongs@ise.fraunhofer.de

ISFH

Carsten Lampe
c.lampe@isfh.de

Fraunhofer IWES

Fabian Thalemann
fabian.thalemann@iwes.fraunhofer.de

IZES

Patrick Hoffmann
hoffmann@izes.de

Einführung

Wärmepumpen sind ein fester Bestandteil im Wärmeerzeugermarkt. Die mittlerweile ausgereifte Technologie bringt gegenüber fossil betriebenen Heizgeräten in den meisten Fällen nicht nur primär-energetische sondern auch ökologische Vorteile. Im Jahr 2014 lag der Marktanteil der Wärmepumpen im Segment Neubau bei 32%. Die Bandbreite in den einzelnen Bundesländern erstreckt sich von 5,1% in Bremen bis hin zu 46,3% in Thüringen.

Vieles spricht dafür, dass Wärmepumpen zur technischen Standardlösung für Heizsysteme in Neubauten werden. Nicht zuletzt wird die (ab dem 1. Januar 2016 verschärfte) Energieeinsparverordnung dazu beitragen. Sowohl Branchenprognosen als auch Simulationsstudien weisen auf einen zukünftig stark wachsenden Wärmepumpenbestand hin [1].

Ein Beispiel dafür ist die Studie „Regenerative Energien Modell – Deutschland REMod-D“, die am Fraunhofer ISE angefertigt wurde [2]. Bei der Entwicklung von Heizungstechnologien auf dem Weg zu einem System mit dominantem Anteil erneuerbarer Energien und unter Berücksichtigung minimaler Transformationskosten, sieht die Studie mittelfristig (im Jahr 2030) einen Anteil der Wärmepumpen an allen Heizungsanlagen von 34% und langfristig (im Jahr 2050) von über 80%.

Bei der Transformation des Energiesystems kann der Wärmepumpe nicht nur aus Effizienzgründen, sondern auch als Koppler der Sektoren Strom und Wärme eine entscheidende Rolle zukommen. Der zunehmend fluktuierenden Einspeisung durch Windkraft und Photovoltaik muss auch mit einer Flexibilisierung der Nachfrageseite begegnet werden. Aufgrund der vorhandenen Speicherkapazitäten können Wärmepumpenanlagen hierfür einen Beitrag leisten. Damit eröffnet sich die Möglichkeit, den zunehmend regenerativ erzeugten Strom effizient für Wärmeanwendungen in Gebäuden zu nutzen.

Neben einem zentral geregelten Demand Side Management (DSM), bei dem Wärmepumpen ausgleichende Regelernergie bereitstellen, können Wärmepumpen auch auf der Ebene der Prosumenten, also der Endnutzer, die nicht nur die elektrische

Energie konsumieren sondern auch produzieren, Vorteile generieren. Im Jahr 2005 war die Solarstromvergütung mehr als dreimal so hoch wie der Preis für den Strom aus der Steckdose. In den letzten zehn Jahren hat sich die Relation massiv geändert. Die Vergütung für die selbst produzierte Kilowattstunde beträgt nur noch die Hälfte des durchschnittlichen Strompreises. Eine Wärmepumpe kann den Selbstnutzungsanteil der produzierten elektrischen Energie steigern und dem Prosumenten somit ökonomische Vorteile verschaffen. Ebenfalls führt es zur Verminderung der eingespeisten Energiemenge und kann indirekt zur Abschwächung der Netzfluktuation beitragen.

Wärmepumpen und die Stromversorgung der Zukunft

Die günstigen Rahmenbedingungen für regenerative Energietechnik haben im Stromsektor zu einem massiven Ausbau der Photovoltaik (PV)- und der Windenergie geführt. Im Jahr 2015 betrug die installierte Anschlussleistung für PV 39.700 MW und für Windkraftanlagen 43.780 MW. Die höchste Einspeisespitze der PV lag in dem Jahr bei 27.300 MW, die der Windkraft bei 35.600 MW [3]. Bezogen auf mittlere Netzlasten von 50.000 MW, greifen diese fluktuierenden Erzeuger bereits heute massiv in die etablierte Erzeugungsstruktur ein.

Es gibt vier wesentliche Maßnahmen, den Herausforderungen durch die fluktuierende Einspeisung zu begegnen:

1. Netzausbau
2. flexiblere konventionelle Kraftwerke
3. zusätzliche Speicher
4. Flexibilisierung der Nachfrageseite (DSM).

Elektrisch angetriebene Wärmepumpen können als Instrument des Demand Side Managements zu letztgenannter Maßnahme beitragen. Die Nutzung thermischer Speicher ermöglicht die Entkopplung von Heizwärme- und Elektroenergiebedarf, wodurch die Wärmepumpenbetriebszeit optimiert werden kann. Ende 2015 waren in Deutschland über 600.000 Wärmepumpen installiert. Für das Jahr 2020 werden 1.200.000 Wärmepumpen mit einer Anschluss-

leistung von 3.600 MW prognostiziert [1]. Nach dieser Studie besteht ein signifikantes DSM-Potenzial für Wärmepumpen, gleichzeitig jedoch auch großer Forschungsbedarf, u. a. hinsichtlich der Kommunikation, den Marktmodellen sowie den Einflüssen von DSM auf die Wärmepumpenanlagen.

Potenzial der Lastverschiebung

Die durchgeführte Studie [4] hat den Mehrbedarf an Elektroenergie einer Wärmepumpenanlage infolge des veränderten Betriebs durch ein externes Signal quantifiziert. Dieses DSM-Signal wurde aus dem Verlauf der Residuallast in Deutschland gebildet und soll den Wärmepumpenbetrieb dahingehend optimieren, die Residuallast zu glätten. Der Mehrbedarf wird durch Effizienzminderung der Wärmepumpe sowie höheren Speicherverlusten verursacht, da die gewünschte Lastverlagerung durch eine Anhebung der Solltemperatur in den Pufferspeichern für Raumheizung und Trinkwassererwärmung realisiert wird.

In verschiedenen Szenarien wurden unterschiedliche DSM-Signale (Residuallasten für 2012 und 2023), Heizleistungen der Wärmepumpen (5,4 kW; 10,8 kW) sowie Volumina des Heizungspufferspeichers (0,5 m³; 2,0 m³) miteinander kombiniert und Jahressimulationen durchgeführt.

Grundsätzlich trägt die Solltemperaturanhebung zur Betriebszeitoptimierung bei. Die Effizienz der Wärmepumpe hat sich in allen Szenarien mit smarter Rege-

lung, infolge der höheren Wärmesenktemperatur, verringert. Der Effizienzminderung durch die Solltemperaturanhebung wirkt jedoch gleichzeitig entgegen, dass keine ineffizientere Heizwärmebereitstellung mit dem Elektroheizstab erfolgen muss. Im Extremfall wurde die Effizienzminderung komplett kompensiert. Die Aktivierung weiterer Speicherkapazität führte bei beiden Speichern zu zusätzlichen Wärmeverlusten. Die Verluste des Heizwasserpufferspeichers (PS-H) wurden im Auslegungsfall (0,5 m³) maximal verdoppelt, bei Überdimensionierung (2,0 m³) verfünffacht.

Beispielhafte Ergebnisse

Die Hauptergebnisse der Simulation bestehen aus der Optimierung der Betriebszeit sowie dem notwendigen Mehrbedarf an Elektroenergie infolge der Effizienzminderung der Wärmepumpe und höherer Speicherverluste.

In *Abbildung 1* wird für jedes Szenario der Elektroenergiebezug der Wärmepumpe als absoluter Wert, sowie verteilt nach DSM-Signal-Bereichen dargestellt. Die grünen Bereiche kennzeichnen die zu Zeiten günstigen DSM-Signals bezogene Elektroenergie. Die smarte Regelung, die eine gezielte Anhebung der Solltemperatur in den Pufferspeichern resultiert, trägt in allen Szenarien zur gewünschten Lastverschiebung bei, wobei diese in ihrem Ausmaß sehr unterschiedlich ausfällt. Bereits ohne Änderungen der Dimensionierung von Anlagenkomponenten ist ein positiver Einfluss durch die smarte Regelung festzustellen.

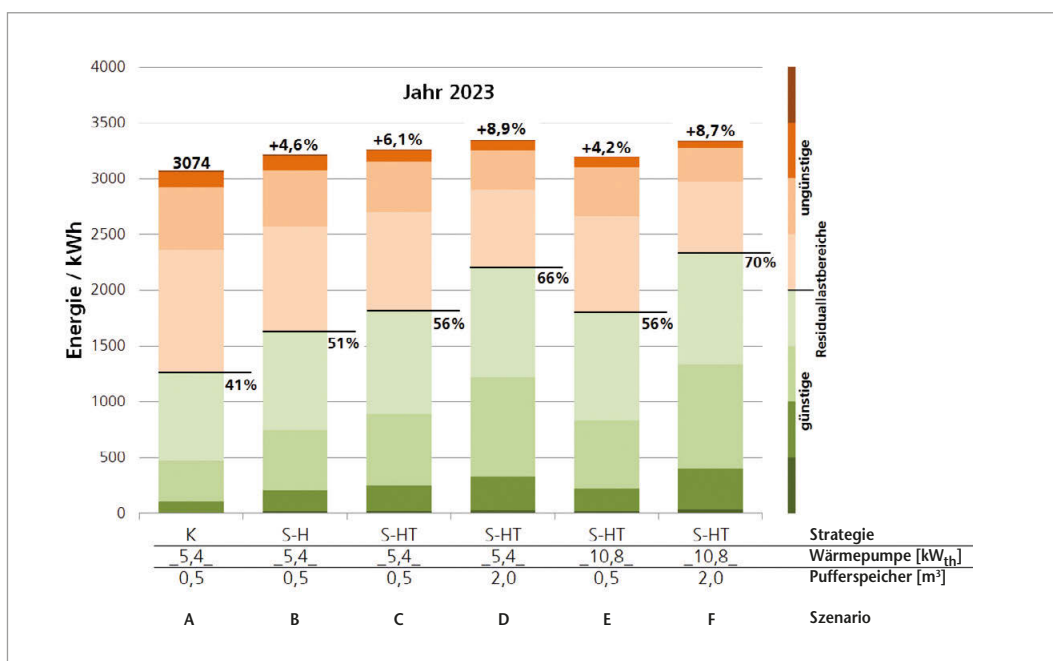


Abbildung 1
Elektroenergiebedarf der Wärmepumpe: Absolutwert und Aufteilung nach DSM-Signal-Bereichen in den Szenarien für 2023

Wird nur der Heizungspufferspeicher in die smarte Regelung eingebunden (Szenario B: S-H_5,4_0,5), steigt der energetische Anteil in Zeiten negativer DSM-Signale auf 51 %, bei zusätzlicher smarter Nutzung des Pufferspeichers für die Trinkwassererwärmung auf 56 % (Szenario C: S-HT_5,4_0,5).

Eine signifikante Zunahme der Lastverschiebung wird durch die Vergrößerung des Speicherpotenzials erzielt. Beim Einsatz des 2 m³ Pufferspeichers (Szenario D: S-HT_5,4_2,0) werden 66 % der Elektroenergie bei negativem DSM-Signal bezogen.

Dennoch stellt sich keine zusätzliche Verbesserung gegenüber der Basisauslegung ein, wenn nur die Wärmepumpe – nicht aber gleichzeitig auch der Pufferspeicher – größer dimensioniert wird. So erreicht Szenario E: S-HT_10,8_0,5 – ebenso wie Szenario C: S-HT_5,4_0,5 – einen Anteil von lediglich 56 %.

Um die größere Wärmepumpenleistung nutzen zu können, wird eine Vergrößerung der Speicherkapazität benötigt, wie in Szenario F: S-HT_10,8_2,0 (70 %).

Die Optimierung der Betriebszeit führt in allen Szenarien zu einem finanziellen Mehraufwand für zusätzliche elektrische Energie. Dieser und etwaige weitere Investitionskosten (Überdimensionierung von Wärmepumpe und Speicher) müssen bei der Entwicklung von Marktmodellen für die Anwendung von Wärmepumpen als DSM-Instrument berücksichtigt werden.

Stand der Technik – Ergebnisse aus Wärmepumpen-Monitoringprojekten

Seit 2005 untersucht das Fraunhofer ISE Wärmepumpenanlagen unter realen Bedingungen. In drei bereits abgeschlossenen und ausgewerteten Projekten wurde unter anderem die Effizienz von ca. 220 Anlagen bestimmt [5].

Die große Mehrheit aller Wärmepumpenanlagen wurde in Einfamilienhäusern installiert. Die untersuchten Wärmepumpen realisierten immer sowohl die Beheizung der Räume als auch die Brauchwassererwärmung. Die untersuchte thermische Leistung erstreckt sich von ca. 6 bis 25 kW. In dem Projekt „Wärmepumpen im Gebäudebestand“ wurden Wärmepumpenanlagen in älteren, überwiegend unsanierten Häusern untersucht.

In zwei weiteren Projekten – „WP-Effizienz“ und „WP Monitor“ waren die Häuser meist nicht älter als drei Jahre. Der mittlere Heizenergieverbrauch beträgt entsprechend 120 kWh/(m²a) in älteren bzw. 70 kWh/(m²a) in neuen Häusern.

Prinzipiell sind bei der Berechnung der Arbeitszahlen unterschiedliche Bilanzgrenzen möglich. Bei den folgenden Ergebnissen wurden für den Elektroenergieaufwand der Kompressor, die Steuerung und Regelung, die Ventilatoren bei Außenluft-Wärmepumpen bzw. Solepumpen bei Erdreich-Wärmepumpen und die Elektroheizstäbe in der Bilanz berücksichtigt. Die bereit gestellte thermische Energie wurde direkt nach der Wärmepumpe (vor dem Pufferspeicher bzw. Trinkwasserspeicher) gemessen.

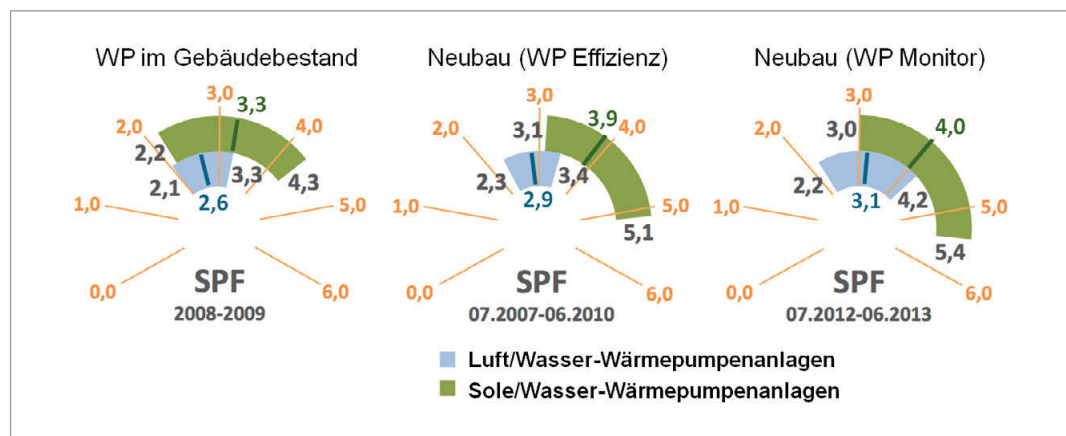
Mittelwerte und Bandbreiten der Arbeitszahlen

Abbildung 2 zeigt die Mittelwerte sowie die Bandbreiten der für alle drei Projekte berechneten Arbeitszahlen mit der Angabe der ausgewerteten Zeitperiode.

Die Unterschiede bei den Mittelwerten sind mit der Art und Temperaturniveau der Wärmequelle, dem Alter der Häuser sowie dem jeweiligen Stand der Technik zur Projektlaufzeit zu erklären.

- Die Wärmepumpenanlagen aus dem letzten Projekt haben die besten Ergebnisse erzielt – dies

Abbildung 2
Monitoringprojekte:
Mittelwerte und
Bandbreiten der
Effizienzergebnissen



weist auf eine positive technologische Weiterentwicklung der Wärmepumpen hin.

- Die Sole/Wasser-Wärmepumpen erreichen im Schnitt bessere Effizienzwerte als die Luft/Wasser-Wärmepumpen.
- Für Wärmepumpen in älteren Gebäuden mit höheren Heizkreistemperaturen wurden geringere Arbeitszahlen ermittelt, als für jene in Neubauten mit Fußbodenheizung und den damit verbundenen vorteilhaften, da geringeren, Heizkreistemperaturen.
- Die Ergebnisse aus allen Projekten zeigen eine kleinere Bandbreite der Effizienzwerte bei den Luft/Wasser- gegenüber den Sole/Wasser-Wärmepumpen. Das große Spektrum bei den Erdreich-Wärmepumpen beweist einerseits das große Potenzial dieser Technologie, andererseits zeigt es, dass die Auswahl der vorteilhafteren, aber teureren Wärmequelle nicht automatisch zu höheren Effizienzwerten führen muss.
- Bei „WP Monitor“ konnte zudem festgestellt werden, dass die Arbeitszahlen der effizientesten Außenluft-Wärmepumpen die mittlere Arbeitszahl der Erdreich-Wärmepumpen übersteigen. Die geringen Effizienzwerte sind auf unnötige Fehler in allen drei Verantwortungsbereichen zurückzuführen: der Planung, der Installation sowie dem Betrieb.

Die mehrjährige Untersuchung von Wärmepumpen im Feld erlaubt folgende zentrale Schlussfolgerung: Gute Voraussetzungen für hohe Effizienzwerte haben vor allem einfache und damit robuste Anlagen, die gut geplant und sorgfältig installiert wurden. Ebenso ist es während der Betriebsphase wichtig, eine Überprüfung der Betriebsparameter und gegebenenfalls eine Anpassung der Regeleinstellungen vorzunehmen. Sind störende Einflüsse erst einmal ausgeschlossen, können die Anlagen, entsprechend ihres Teststand-COPs, optimale Arbeitszahlen im Feld erreichen.

Sorptionswärmepumpen

Noch ganz am Anfang einer Marktdurchdringung stehen Sorptionswärmepumpen. Im Gegensatz zu elektrisch betriebenen Kompressionswärmepumpen nutzen Sorptionswärmepumpen Wärme auf hohem Temperaturniveau als Antriebsmedium für den Wärmetransformationsprozess. Typischerweise wird für den thermischen Antrieb ein Gas-Brennwertmodul verwendet (Gaswärmepumpe). Wie bei einer Kompressionswärmepumpe wird Umweltwärme aus einer Niedertemperaturquelle mittels Erdreichkoppelung oder Außenluftnutzung eingesetzt, allerdings ist bei Sorptionswärmepumpen dieser Anteil der

Umweltwärme an der Nutzwärme geringer als bei Kompressionswärmepumpen. Damit sind mit bisherigen Geräten Leistungszahlen (Nutzwärmeleistung/Antriebswärmeleistung) bis zu 1,6 erreichbar; auf Jahresebene kann damit ein Gasausnutzungsgrad von bis zu 140% (brennwertbezogen) erwartet werden. Die Ausnutzung des fossilen Brennstoffs Gas wird damit im Vergleich zu Brennwertkesseln signifikant erhöht. Gleichzeitig benötigen Gaswärmepumpen eine Niedertemperaturquelle von deutlich kleinerer Leistung als Elektrowärmepumpen gleicher Wärmeleistung. Dies ist ein Vorteil in der Bestandsbausanierung mit begrenzten Möglichkeiten in der Erschließung der Niedertemperaturquellen.

Wie bei den thermisch angetriebenen Kälteanlagen kommen auch bei den Sorptionswärmepumpen zwei unterschiedliche Technologien zum Einsatz:

• Adsorptionstechnik:

sorptiv beschichtete Wärmeübertrager; das Adsorbens nimmt den Kältemitteldampf aus dem Verdampfer auf und muss zyklisch regeneriert werden. Kennzeichen ist daher ein periodischer Betrieb des Wärmeübertragers im Wechsel zwischen Adsorption und Regeneration (letztere geschieht durch Wärmeeintrag aus der Antriebsquelle). Typischerweise wird Wasser als Kältemittel eingesetzt; dies begrenzt allerdings den Verdampferbetrieb auf Temperaturen $> 0^\circ\text{C}$. Die Technik wird daher auch im Zusammenhang mit Solarkollektoren angeboten, um den Einsatzbereich des Sorptionsmoduls bei niedrigen Quellentemperaturen zu erweitern. Anbieter von Gasadsorptionswärmepumpen sind z. B. Vaillant und Viessmann.

• Absorptionstechnik:

kontinuierlicher Kreislauf des flüssigen Arbeitsmittelpaares, das im Absorber Kältemitteldampf aus dem Verdampfer aufnimmt und dieses im Generator (Wärmeeintrag aus Antriebsquelle) wieder abgibt. Mehrere Anbieter dieser Technik nutzen das Stoffpaar Ammoniak (Kältemittel) und Wasser (Sorptionsmittel). Der Vorteil dieser Technik ist der Betrieb des Verdampfers bei Temperaturen unter 0°C , etwa in Luft/Wasser-Wärmepumpen. Gasabsorptionswärmepumpen werden beispielsweise von Robur, Bosch, Buderus oder Junkers angeboten.

Der optimale Einsatz von Sorptionswärmepumpen liegt derzeit noch in der Wärmeversorgung mit Vorlauftemperaturen unter 50°C , also typischerweise für Anwendungen im Zusammenhang mit Flächenheizsystemen. Für höhere Temperaturen und für die Warmwasserbereitung kann direkt der Gasbrenner genutzt werden, dessen häufiger alleiniger Einsatz

senkt allerdings die Jahresarbeitszahl. Die Erreichung höherer Vorlauftemperaturen mit dem Sorptionsmodul ist noch Gegenstand von F&E-Aktivitäten.

Herausforderungen für die Zukunft

Wärmepumpen werden in der Zukunft für die Bereitstellung von Wärme (und Kälte) sowohl in Wohn- als auch in Nichtwohngebäuden eine zunehmend wichtige Rolle spielen. Gleichzeitig sind sie eine Chance für die zielführende Vereinigung des Strom- und Wärmesektors.

Die Potenziale der Wärmepumpentechnologie stehen außer Frage. Um diese tatsächlich zu nutzen, sind noch einige Herausforderungen zu meistern:

- Die technologische Reife der Wärmepumpe und die damit verbundene hohe Effizienz, die theoretisch erreicht werden kann, werden teilweise durch eine fehlerhafte Umsetzung vermindert. Die fehlerfreie Planung, die sorgfältige Installation und ein korrekter Betrieb sind Voraussetzungen für eine großflächige, ökonomisch und ökologisch zweckmäßige Anwendung der Wärmepumpentechnologie.
- Ein konkretes Problem bei den Sole/Wasser-Wärmepumpen ist die korrekte Anbindung der Wärmequelle. Dieser Punkt betrifft sowohl die korrekte technische Umsetzung der Wärmequellenanschlüsse als auch eine optimale, kostenbewusste Planung. Die Mehrkosten, die die Wärmequelle Erdschicht gegenüber der Wärmequelle Luft mit sich bringt, sind nur dann gerechtfertigt, wenn das volle Effizienzpotenzial dieser Technologie ausgeschöpft wird und nicht durch unnötige Fehler vermindert wird.
- Für die weitere Verbreitung der Außenluft-Wärmepumpen wird entscheidend sein, in welchem Ausmaß sich Industrie und Forschung dem Thema Lärm widmen. In den letzten Jahren wurde das Thema erkannt und angegangen, es besteht jedoch noch großer Optimierungsbedarf sowohl hinsichtlich der Verringerung von Schallemissionen als auch bezüglich des zweckmäßigen Aufstellortes der Wärmepumpe bzw. deren Außen-einheit.
- Ein zukünftiges Problem für das gesamte Energiesystem kann die sogenannte Thermosensibilität werden. Bei der strombasierten Heizung steigt die Stromnachfrage mit geringeren Außenlufttemperaturen bzw. höherer Heizlast an. Die Thermosensibilität gibt dann an, wie viel elektrische Leistung pro Kelvin sinkender Außentemperatur zusätzlich benötigt wird. Diesbezüglich besteht

weiterer Forschungsbedarf, um für die Transformation des Stromsystems ein passendes „Überschussmanagement“ zu entwickeln [6].

- Die Flexibilisierung der Wärmepumpenlaufzeit, kann eine Verschlechterung der Effizienz der Wärmepumpen und/oder zusätzliche Investitionen zur Folge haben. Um damit verbundene Mehrkosten zu kompensieren, müssen entsprechende Geschäftsmodelle entwickelt werden.
- In Deutschland gibt es noch keine flexiblen Stromtarife, die den Wärmepumpenbetrieb bei Wind und Sonne erhöhen könnten. Es ist jedoch bereits jetzt möglich, die Nutzung des eigen erzeugten PV-Stroms zu steigern. Eine besonders gute Übereinstimmung des zur Verfügung stehenden Eigenstroms und des Wärmebedarfs lässt sich im Fall der Warmwasser-Wärmepumpe erreichen.

Literatur

- [1] Bundesverband Wärmepumpe (BWP) e.V., BWP-Branchenstudie 2013, Szenarien und politische Handlungsempfehlungen, Berlin, 2013
- [2] Henning, H-M.; Palzer, A., Energiesystem Deutschland 2050, Sektor- und Energieträgerübergreifende, modellbasierte, ganzheitliche Untersuchung zur langfristigen Reduktion energiebedingter CO₂-Emissionen durch Energieeffizienz und den Einsatz Erneuerbarer Energien, Fraunhofer ISE, 2013
- [3] Wirth, H., Aktuelle Fakten zur Photovoltaik in Deutschland, Fraunhofer ISE, Fassung vom 25.12.2015
- [4] Miara, M.; Günther, D.; Leitner, Z.L.; Wapler, J., Simulation of an air-to-water heat pump system to evaluate the impact of demand-side-management measures on efficiency and load-shifting potential, Energy technology 2 (2014), No.1, pp. 90–99
- [5] Miara, M.; Günther, D.; Langner, R.; Helmling, S., Efficiency of Heat Pumps in Real Operating Conditions – Comparison of three Monitoring Campaigns in Germany, Rehva Journal 51 (2014), pp. 7–12
- [6] Hauser, E.; Guss, H.; Hoffmann, P.; Weber, A.; Schmidt, D.; Schumacher, P.; Gerhardt, N., Eignung von KWK und Wärmepumpen zum Ausgleich der fluktuierenden Stromerzeugung (FEE): eine energie-wirtschaftliche Betrachtung, FVEE Themen 2012, pp. 80–83

Materialforschung für die Wärmewende

Bedeutung der Materialforschung für die Wärmewende

Strukturmaterialien mit wohldefinierten Eigenschaften bestimmen auch im Wärmesektor zu einem erheblichen Teil die Effizienz der Energiesysteme. Gelingt es – neben dem gezielten Design von spezifischen funktionellen Materialparametern – auch die Herstellungskosten gering zu halten, so lassen sich erhebliche Potenziale zur Steigerung der Effizienz nutzen. Dies gilt sowohl bei der Wärmeerzeugung, bei der Wärmespeicherung, als auch bei der Wandlung von Wärme in andere Energieformen wie etwa in elektrische Energie. Die Materialforschung hat in diesem Zusammenhang einen wichtigen Stellenwert. Denn nur durch das grundlegende Verständnis der mikroskopischen Mechanismen, die zu einem bestimmten, oftmals auf komplexe Weise gekoppelten Satz von Materialparametern führen, können innovative Materialien mit optimierten oder gar bisher unbekanntem Eigenschaften für den Einsatz in der technologischen Anwendung hergestellt werden. Die Vielfalt materialwissenschaftlicher Fragestellungen ist immens. Sie ergeben sich aus der kritisch hinterfragenden Grundlagenforschung ebenso wie aus Lösungsansätzen zu konkreten Anwendungen, die die Industrie zukünftig anbieten wird.

Anhand der folgenden Beispiele aktueller Materialforschungsthemen aus dem Deutschen Biomasseforschungszentrum (DBFZ), dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), dem Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme (ISE), dem Institut für Solarenergieforschung (ISFH), dem Bayerischen Zentrum für Angewandte Energieforschung (ZAE) und dem Helmholtz-Zentrum Berlin für Materialien und Energie (HZB), alle Partner im FVEE, soll die Vielschichtigkeit der Themen aber auch die Wichtigkeit der Materialforschung für die Wärmewende illustriert werden.

Werkstoffkompositforschung für die nachhaltige energetische Biomassenutzung

Der nachhaltige Umgang mit verfügbaren Ressourcen zur Wärmeerzeugung kann durch die Erschließung von Alternativen zu fossilen Brennstoffen

umgesetzt werden. Erhebliches Potenzial liegt dabei in der Verwendung von Rest- und Abfallbiomassebrennstoffen. Die durch die Nutzung dieser Brennstoffe sehr viel höhere Feinstaubemission im Vergleich zu den hochwertigen holzbasierten Biomassebrennstoffen ist durch den Einsatz von Elektro-Abscheidern vermeidbar. In diesen erfolgt die Gasreinigung durch die Abscheidung von elektrisch aufgeladenen Feinstaubpartikeln an Sammelelektroden. Bei der Verwendung von Rest- und Abfallbiomassebrennstoffen in Feuerungen kleiner Leistung haben Elektro-Abscheider jedoch häufig eine geringe ökonomische und funktionelle Anlageneffizienz. Diese Effizienz zu steigern motiviert die Werkstoffforschung am DBFZ zu Emailkompositen. Das sind kostengünstige Materialien, die hohe Abrasions- und Korrosionsresistenz, Temperaturstabilität im Anwendungstemperaturbereich bis 600 °C mit hoher elektrischer Leitfähigkeit kombinieren. Mittels elektrisch leitfähigem Email kann die Funktionsweise von Emissionsminderungsanlagen auch in korrosiven Umgebungen gewährleistet werden, die durch den Einsatz schwieriger Biomassebrennstoffe bedingt sind.

Die technologische Herausforderung liegt darin, zwei Grundwerkstoffe zu kombinieren, nämlich den elektrisch nicht leitfähigen Emailsclicker mit elektrisch leitfähigen, oxidationsaffinen Zuschlägen, ohne dabei ein Aufschwimmen des Emailkomposits zu erzeugen (*Abbildung 1*). Im Zuge dieser Forschung ist es gelungen, den Nachweis der Kombinationsfähigkeit der Grundwerkstoffe zu erbringen, dem Emailkomposit elektrische Leitfähigkeit zu verleihen und dabei die Abrasions- und Korrosionsbeständigkeit für bestimmte Materialkombinationen sogar noch zu verbessern. Je nachdem wie die Grundwerkstoffe eingestellt werden, ergeben sich unterschiedliche Materialkomposite, die unterschiedliche elektrische bzw. mechanische Eigenschaften und damit unterschiedliche Einsatzpotenziale ermöglichen. Neben der Emissionsminderungstechnik zur Umsetzung der nachhaltigen regionalen energetischen Nutzung von alternativen Biomasse-, Rest- und Abfallbrennstoffen in der thermo-chemischen Biomassekonversion, ist auch der Einsatz in Plattenwärmeübertragern in der Kraftwerkstechnik, oder als Oberflächenbeschichtung in der chemischen Industrie in der Polymerisationsprozess- und Grundstoffsynthese und in weiteren Bereichen möglich.



HZB

Dr. Klaus Habicht
habicht@helmholtz-berlin.de

Dr. Katharina Fritsch
katharina.fritsch@helmholtz-berlin.de

DBFZ

Christian Koch
christian.koch@dbfz.de

DLR

Dr. Antje Wörner
antje.woerner@dlr.de

Thomas Bauer
thomas.bauer@dlr.de

Fraunhofer ISE

Dr. Stefan Henninger
stefan.henninger@ise.fraunhofer.de

ISFH

Dr. Rolf Reineke-Koch
r.reineke-koch@isfh.de

ZAE

Dr. Jochen Manara
jochen.manara@zae-bayern.de

Abbildung 1

Materialien für Abgasfilteranlagen

Links: Korrosionswirkung auf den Elektrodenwerkstoff in einer Abgasfilteranlage nach 24-stündigem Betrieb mit alternativen Biomassebrennstoffen
 Rechts: Probe eines am DBFZ entwickelten elektrisch leitfähigen Emailkomposits mit hoher Abrasions- und Korrosionsresistenz



Materialien für thermische Energiespeicher im Hochtemperaturbereich

Thermische Energiespeicher (auch „Wärmespeicher“ genannt), sind aus Anwendungen wie Thermosflaschen, häuslichen Warmwasserspeichern oder Nachtspeicheröfen bekannt. Verglichen mit anderen Speichertechnologien weisen thermische Energiespeicher, wie sie am DLR untersucht werden, typischerweise Vorteile wie niedrige Kosten, hohe Zyklenstabilitäten und hohe Wirkungsgrade auf.

Es werden üblicherweise drei Typen von Wärmespeichern unterschieden:

- Sensible Wärmespeicher beruhen darauf, ein Medium wie Wasser oder Keramik zu erwärmen.
- Nutzt man einen Phasenübergang aus, handelt es sich um einen Latentwärmespeicher.

- Thermochemische Speicher basieren auf reversiblen chemischen Reaktionen [1,2].

Die Materialfragestellungen zu thermischen Energiespeichern im Hochtemperaturbereich sind vielfältig. Zum einen beziehen sich diese auf die Speichermaterialien wie Keramik, Naturstein, Oxide, Hydride, sowie feste und flüssige Salze. Zum anderen kommen in Speichersystemen weitere Subkomponenten wie Wärmeträger, Behälter, Wärmeübertrager, Pumpen, Ventile, Verrohrung, Isolation und Fundamente zum Einsatz, die zum Teil ebenfalls Fragen zur Materialforschung aufwerfen.

Für das Speichermaterial und die Subkomponenten fokussieren sich die Materialarbeiten für Wärmespeicher im Hochtemperaturbereich auf Bereiche wie Thermomechanik, Partikeltransport, thermophysikalische Eigenschaften, Aspekte des fest-flüssig Phasenwechsels, metallische Korrosion, Zersetzungs-

Abbildung 2

Thermische Energiespeicher:

Technologien im Hochtemperaturbereich sowie die am DLR betriebenen Testanlagen

Sensibel in Feststoffen

Keramik, Naturstein

DLR Technikum für Regeneratorspeicher

Sensibel in Flüssigkeiten

Flüssigsalz, Mineralöl, Druckwasser

DLR Testapparatur zur Entwicklung von Hochtemperatur-Salzen

Latent (fest – flüssig)

Salze

DLR Testanlage für PCM-Speicher

Thermochemisch (Gas-Feststoff-Reaktion)

Salze, Salzhydrate, Oxide, Hydride

DLR Testanlage für thermochemische Speicher

prozesse und Reaktionskinetik. Das breite Spektrum ergibt sich aus den unterschiedlichen Technologien zur Wärmespeicherung (*Abbildung 2*). Für die Verbesserung von kommerziellen Speichern und für die erfolgreiche Markteinführung neuer Technologien zur thermischen Energiespeicherung im Hochtemperaturbereich ist der wissenschaftliche Fortschritt bei vielen dieser Materialfragestellungen entscheidend.

Metallorganische Gerüstmaterialien für Wärmepumpen und Kältemaschinen

Thermische Wärmepumpen und Kältemaschinen, deren Funktionsprinzip auf Wasserdampfadsorption basiert, benötigen Werkstoffe, die einerseits eine hohe Adsorptionskapazität für das Arbeitsmedium aufweisen, andererseits aber auch eine hohe Zyklenstabilität beim wiederholten Durchlaufen des hydrothermalen Kreislaufs besitzen.

Metallorganische Gerüstmaterialien, engl. metal organic frameworks (MOF), sind dafür bestens geeignete Werkstoffe, die am Fraunhofer ISE untersucht und optimiert werden. Ein Vorteil dieser Materialien liegt in ihrem modularen Aufbau: durch geeignete Wahl eines organischen Linkers und eines Metall-Clusters können verschiedene dreidimensionale (3D) Strukturen hergestellt werden. Diese Flexibilität bei der Synthese der mikroskopischen Struktur erlaubt das Maßschneidern für spezifische Anwendungen. Die 3D-Strukturen (*Abbildung 3*) zeichnen sich durch sehr hohe innere Oberflächen und sehr hohe Porenvolumina aus, beides sind die zu variierenden Parameter für die Gassorption. So korreliert ein hohes Porenvolumen mit einer hohen Kapazität, die Oberfläche korreliert mit der Anzahl der Wechselwirkungspunkte und damit mit der Form der Isothermen.

Die für die Anwendung in thermischen Wärmepumpen und Kältemaschinen basierend auf Wasserdampfadsorption so wichtige Zyklenstabilität konnte in Experimenten für verschiedene Kandidaten, beispielsweise mikroporöses Aluminium-Fumarat oder Aluminium-Isophthalat (CAU-10-H), erfolgreich nachgewiesen werden. Maßstabsvergrößerte Synthesen erreichen bereits vor-industrielle Größenordnungen im kg-Maßstab, die für den Bau von Prototypen und zur Demonstration der technologischen Umsetzung ausreichen.

Weitere materialwissenschaftliche Fragestellungen ergeben sich aus der Kombination der funktionellen MOFs mit Trägermaterialien. Hier wurde neben der binderbasierten Beschichtung auf unterschiedlichen Trägern die Direktaufkristallisation als vielversprechend angesehen.

Überhitzungsschutz für Kollektoren mit thermochromen Absorbern

Solkollektoren zur Bereitstellung von Warmwasser und Heizwärme sind ein wichtiger Bestandteil bei der Nutzung regenerativer Energien. Die Solarkollektoren besitzen in der Regel eine sehr gute Effizienz: das Sonnenlicht wird zu etwa 95% absorbiert, Wärme wird nur minimal abgestrahlt und konvektive Verluste werden durch Dämmung und Glasabdeckung reduziert. Dieses Konzept ist optimal, solange die Wärme genutzt beziehungsweise in den Speicher abtransportiert werden kann. Hat der Speicher jedoch seine maximale Betriebstemperatur erreicht, wird die Umwälzpumpe abgestellt und der Kollektor heizt sich bis auf etwa 200 °C auf. Ein solches System muss auf diese hohen Temperaturen und die damit verbundene Dampfbildung ausgelegt sein. Dies ist ein wesentlicher Kostenfaktor.

Eine Lösung bieten thermochrome Absorberschichten, wie sie am ISFH entwickelt werden. Thermochrome Absorberschichtungen weisen die Besonderheit auf, dass ihr Emissionsvermögen für Wärmestrahlung stark temperaturabhängig ist: Im Betriebsbereich des Kollektors weist die Oberfläche einen niedrigen, mit dem von marktüblichen hochselektiven Absorbern vergleichbaren Emissionsgrad auf. Oberhalb einer bestimmten Schalttemperatur wird der Emissionsgrad um ein Vielfaches erhöht. Dadurch steigt der durch Strahlung bedingte Wärmetransport zwischen Absorber und Glasscheibe deutlich an, die Kollektor-Wärmeverluste werden erhöht und damit die Stagnationstemperatur gesenkt.

Der Einsatz von thermochromen Absorberschichtungen ermöglicht eine signifikante Reduzierung der im Stagnationsfall auf Kollektor und Solaranlage einwirkenden Temperaturbelastungen. Durch Verwen-

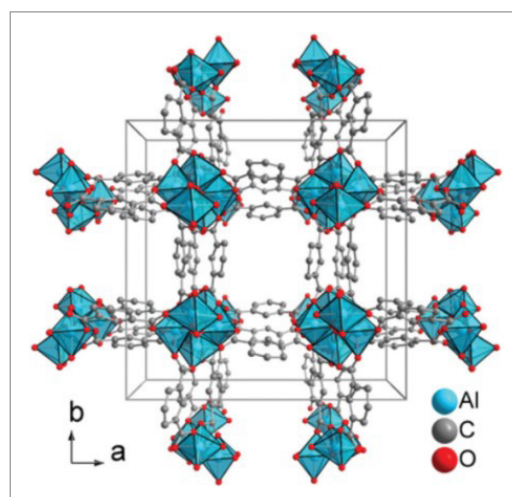


Abbildung 3
Metallorganische Gerüstmaterialien (MOF):
mikroskopische Struktur des MOF Aluminium-Isophthalat CAU-10-H, der am Fraunhofer ISE untersucht wurde.

derung weniger temperaturbeständiger Materialien kann somit eine Kostensenkung für den Kollektor, aber vor allem für das gesamte solarthermische System erreicht werden. Zudem führt die Vermeidung von Dampfbildung im Solarkreis zu einer erhöhten Betriebssicherheit der Anlage.

Der am ISFH entwickelte thermochrome Absorber (*Abbildung 4*) besteht die für den Einsatz im Bauwesen erforderlichen Beständigkeitsprüfungen und Temperaturwechselfests. Das Projekt wird vom BMWi unter dem Förderzeichen 0325988 A und B gefördert.

Innovative Baumaterialien und Bauelemente zur Erhöhung der Energieeffizienz

Die Bundesregierung strebt bis zum Jahr 2020 eine Absenkung der CO₂-Emissionen um 20% gegenüber dem Stand von 1990 an. Dabei kommt der Optimierung der Energieeffizienz eine besondere Bedeutung zu. Ein wichtiger Sektor ist dabei der Gebäudebereich. Heute steht für die energetische Sanierung und den Passiv- sowie Niedrigenergiehausbau in Deutschland eine Vielfalt von Möglichkeiten zur Verfügung. Die Realisierung dieser Ziele erfordert jedoch neben dem Einsatz konventioneller Lösungen (klassische Wärmedämmung, Isolierverglasungen, Wärmerückgewinnung, Sonnenschutz, moderne Heiz- und Klimaanlage) zusätzliche Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten, vor allem für neue und innovative Materialien, Komponenten und Systeme.

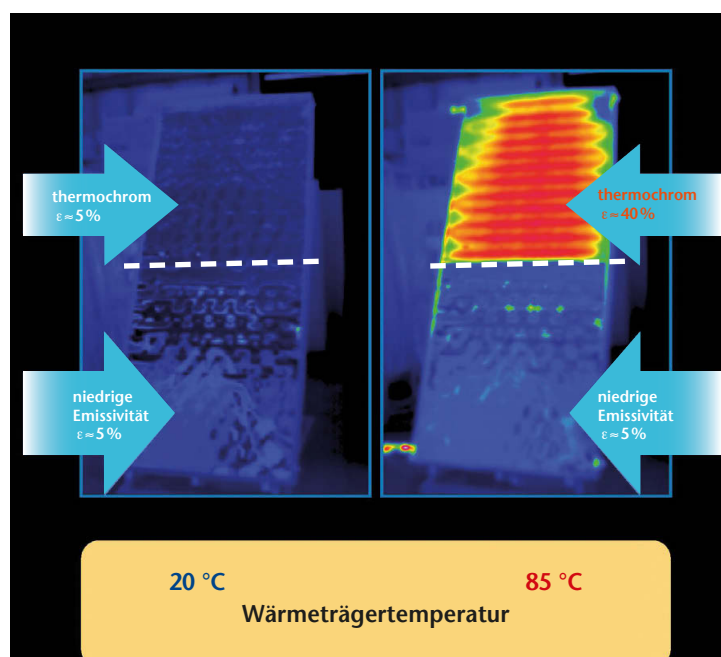
Beispiele für die Materialforschung am ZAE sind das Themenfeld „textile Architektur“ mit niedrigemittierenden Beschichtungen, welche die Wärmedämmung und die thermische Behaglichkeit durch eine verminderte Wärmeabstrahlung verbessern [3], sowie sogenannte Phase Change Materials (PCM), welche Wärme effizient speichern können [4].

Weitere Ansätze mit hohem Entwicklungspotenzial stellen adaptive Gebäudekomponenten dar, die in der Gebäudehülle zum Einsatz kommen und die auf einfache Weise (d. h. passiv) zwischen durchlässig und undurchlässig schalten können [5]. Solche Komponenten eignen sich sowohl für Wärme (schaltbare Wärmedämmung) als auch für Tageslicht bzw. Sonnenstrahlung (schaltbare Verglasung).

Schaltbare Wärmedämmung (siehe *Abbildung 5*) ermöglicht, dass im Winter bei Sonneneinstrahlung die Wärme durch die opake Wand in den Innenraum geleitet wird (wärmeleitender Zustand). Bei fehlender Sonneneinstrahlung hingegen wird die Wärme im Raum gehalten (wärmedämmender Zustand).

Die schaltbare Verglasung funktioniert ähnlich und schaltet bedarfsabhängig von durchsichtig nach nicht-durchsichtig. Eine Weiterentwicklung zu bestehenden Systemen stellt dabei die Schaltung mittels einer Anpassung des Brechungsindex lichtstreuender Materialien dar.

Abbildung 4
Absorber-Vergleich:
Der Kollektor ist zweigeteilt:
oben: thermochromer Absorber
unten: Standard-Absorber
Das Bild zeigt die Infrarot-Abstrahlung beider Absorber bei 20 °C (links) und 85 °C (rechts).
(© ISFH)



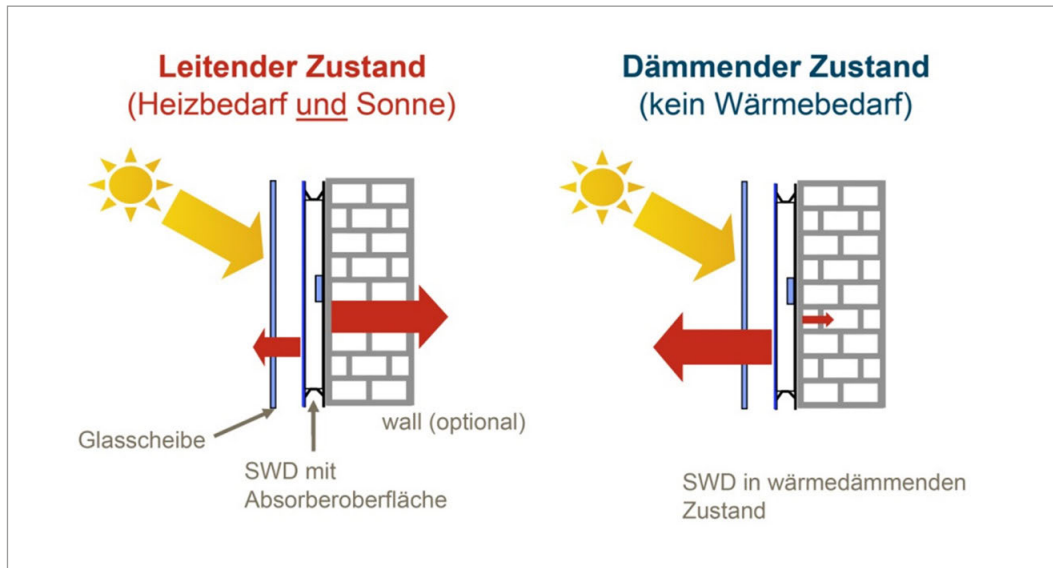


Abbildung 5
Schaltbare Wärmedämmung (SWD)
 Links: Im Winter bei Sonneneinstrahlung SWD wärmeleitend geschaltet, um zusätzliche Energieeinträge zu generieren.
 Rechts: Im Sommer SWD wärmedämmend geschaltet, um Wärmeinträge von außen zu vermindern.

Grundlagenforschung zu mikroskopischen Eigenschaften thermoelektrischer Materialien

Angewandte Forschung zu neuartigen thermoelektrischen Materialien stützt sich vor allem auf makroskopische Charakterisierungsmethoden, die die relevanten Parameter messen, wie z.B. die elektrische Leitfähigkeit, die thermische Leitfähigkeit und den Seebeck-Koeffizienten (ein Maß für die in einem Material erzeugte elektrische Spannungsdifferenz bei gegebener anliegender Temperaturdifferenz). Diese Materialparameter bestimmen die thermoelektrische Gütezahl eines Materials und damit letztendlich die Effizienz der Umwandlung von Wärme in elektrische Energie.

Um aber gezielte Strategien für die Materialentwicklung und -optimierung zu formulieren, ist das grundlegende Verständnis zu den Ursachen geringer thermischer Leitfähigkeit oder bestimmter elektronischer Eigenschaften notwendig. Diese Eigenschaften erfordern Untersuchungsmethoden mit mikroskopischen Sonden, wie sie mit den Charakterisierungsmöglichkeiten an den Großgeräten des HZB mit Synchrotronmethoden für das elektronische System und Neutronenstreuung für die Untersuchung von Gitterschwingungen, die die Wärmeausbreitung auf atomarer Längenskala beschreiben, zur Verfügung stehen.

Im Zentrum der materialwissenschaftlichen Arbeiten zu Thermoelektrika stehen Modellmaterialien,

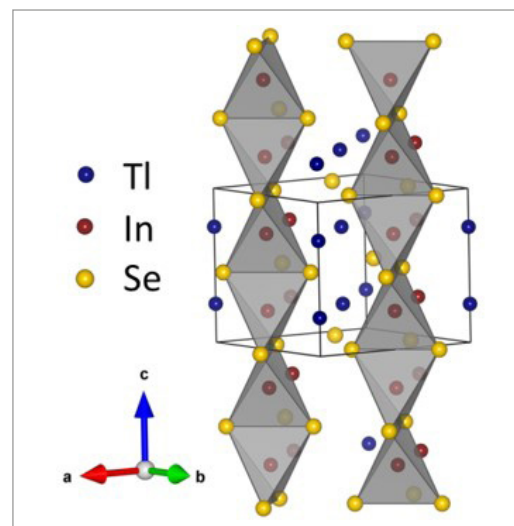
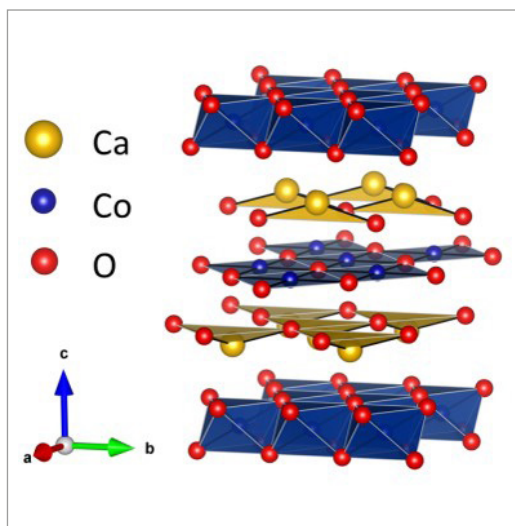


Abbildung 6
Mikroskopische Struktur thermoelektrischer Modellmaterialien.
 Strukturen mit niedriger Dimensionalität (links: zweidimensionaler Schichtaufbau von $\text{Ca}_3\text{Co}_4\text{O}_9$, rechts: quasi-eindimensionale Struktur von TlInSe_2) sind potenziell besonders geeignet, gute wärmeisolierende Eigenschaften auf mikroskopischer Längenskala zu zeigen

an denen der Zusammenhang von Kristallstruktur, Dynamik der Gitterschwingungen und elektronischer Bandstruktur untersucht wird. Dabei stehen insbesondere solche Materialien im Fokus, deren Kristallstruktur die (unerwünschte) Wärmeausbreitung durch schwache Kopplung der schwingenden Ionen und Atomrümpfe verhindert. Gleichzeitig gilt es, elektronischen Transport über mikroskopische Grenzflächen und strukturelle Einheiten auf der atomaren Längenskala möglichst ungehindert zu gestatten.

Das in Zukunft an Gewicht gewinnende computer-gestützte Design von Materialien erfordert eine Überprüfung der Verlässlichkeit der berechneten Materialeigenschaften durch den Vergleich mit experimentellen Daten zur Energie und Lebensdauer der Gitterschwingungen sowie zur elektronischen Struktur. Nur bei guter Übereinstimmung können verlässliche Vorhersagen der makroskopischen Materialparameter getroffen werden.

Zusammenfassung

Allein diese begrenzte Auswahl von Beispielen aus der breiten Palette der Materialforschungsthemen zeigt, dass ein grundlegendes Verständnis zu funktionellen chemischen und physikalischen Materialparametern zum gezielten Design von Materialien führt, deren gewünschte Eigenschaften sich durch die jeweilige Anwendung definieren. Die Materialforschung spielt deshalb weiterhin eine wichtige Rolle für die Umsetzung der Energiewende auch im Wärmesektor. Für den Erfolg wird einerseits die schnelle Rückkopplung der gesamten Wertschöpfungskette von der Grundlagenforschung über die anwendungsnahe Forschung bis hin zur industriellen Nutzung benötigt. Andererseits werden die Vielfalt und das Zusammenspiel vieler Forschungsinstitute und Forschungsinfrastrukturen mit der universitären Forschung für den Erfolg der Wärmewende entscheidend sein. Die Vernetzung der FVEE-Forschungseinrichtungen kann deshalb auch für vielfältige Synergien für die Materialforschung genutzt werden.

Referenzen

- [1] Thess, A., Trieb, F., Wörner, A., et al. (2015) Herausforderung Wärmespeicher, *Physik Journal*, 14, pp. 33–39.
- [2] Bauer, T. Steinmann, W.-D., Laing, D, et al. (2012) Chapter 5: Thermal energy storage materials and systems, in „Annual Review of Heat Transfer, Vol. 15, „ edited by Chen, G., Begell House, Inc., pp. 131–177, doi: 10.1615/AnnualRevHeatTransfer.2012004651.
- [3] J. Manara, M. Lenhart-Rydzek, N. Wolf, M. Arduini-Schuster: Niedrigemittierende Funktionsschichten auf Membranen zur Erhöhung der Energieeffizienz. *Bautechnik* 90 (2013) 219–224.
- [4] J. Manara: Wärmespeicher als integrierte und nicht integrierte Bauteile. *DIB* 4 (2011) 3–5.
- [5] H.-P. Ebert, C. Stark, C. Römer, J. Wachtel, M. Reim, S. Vidi, C. Scherdel, W. Körner, H. Weinläder, C. Balzer, G. Reichenauer, J. Manara: Materialien und Komponenten zur energetischen Optimierung von Feuchte, Licht und Wärme in Gebäuden. *EnOB-Symposium „Energieinnovationen in Neubau und Sanierung“*, 20.–21.03.2014, Essen.

Tiefengeothermie als Grundlastwärmequelle in der Metropolregion München

Zusammenfassung

Die Tiefengeothermie hat von allen erneuerbaren Energien das größte Potenzial, fossile Energieträger wie Kohle, Gas und Öl als Lieferant für Fernwärme zu substituieren. Die Vorteile sind die stete, von klimatischen Bedingungen unabhängige Verfügbarkeit der Ressource Erdwärme und der geringe Flächenbedarf. Die Nachteile sind bisher die relativ hohen Investitionskosten bei gleichzeitiger Unsicherheit in der Fündigkeit, sowie die Notwendigkeit von Modernisierung und Ausbau von Fernwärmenetzen. Das Erschließungsrisiko kann durch geothermiespezifische, standortbezogene Erkundungsmethoden minimiert werden, während die Nutzung der tiefen Erdwärme durch effiziente Anbindung an den Endnutzer und die Kopplung mit anderen Energieträgern sowie mit Wärmespeicherung optimiert werden kann. Letztlich ist die Nutzung der Tiefengeothermie als Grundlastwärmequelle aber nur dort effizient, wo auch eine hohe Dichte an Wärmekunden vorhanden ist. Ein Beispiel für die Erkundung und effiziente Nutzung geothermaler Ressourcen in urbanen Gebieten ist die Metropolregion München, wo die bislang höchste Dichte an tiefengeothermischen Projekten in Europa vorliegt.

Überblick

Die Nutzung der natürlich vorkommenden Erdwärme ist eine der ältesten Methoden zum Beheizen von Gebäuden, wie antike Fernwärmenetze der Römer beispielsweise in Pompeji zeigen. Heutzutage versteht man unter geothermischer Nutzung den Einsatz von Erdwärmekollektoren und -sonden im oberflächennahen Bereich für den Betrieb von Einzelgebäuden, oder die hydrothermale Bohrungsdoulette, die aus Tiefen häufig unterhalb von 2 km heiße Fluide in einem Thermalwasserkreislauf zur indirekten Speisung von Fernwärmenetzen fördert. Daneben gibt es die Spezialverfahren tiefe Erdwärmesonde und petrothermale Geothermie.

In der Tiefengeothermie wird der natürliche geothermische Gradient genutzt, durch den mit zunehmender Tiefe ein Temperaturanstieg von durchschnittlich 30 K/km erfolgt. Für die Umsetzung der Wärmewende kommt insbesondere die Tiefengeo-

thermie mit der Nutzung hydrothermaler Ressourcen in Frage, da die Machbarkeit bereits unter Beweis gestellt wurde. Diese Ressourcen liegen in Deutschland im norddeutschen Becken, dem Oberrheingraben und dem süddeutschen Molassebecken vor. Beste geothermische Ressourcen liegen vor, wenn günstige geothermische Verhältnisse untertage mit einer hohen Wärmeabnehmerdichte über Tage zusammenkommen. Diese Situation trifft für die Metropolregion München zu.

Erkundung und Erschließung geothermischer Ressourcen

Das süddeutsche Molassebecken stellt ein keilförmiges Sedimentbecken dar, in dem bisher eine etwa 150 Mio. Jahre alte Kalksteinschicht als hydrothermale Ressource im Tiefenbereich von 1500 m bis 5000 m genutzt wird (*Abbildung 1, links*). Die intensive Erkundung nach Georessourcen begann im Molassebecken zwar schon in den 1950er Jahren mit der Exploration nach Erdgas und Erdöl. Aber erst seit etwa 15 Jahren wird dieser Kalkstein, der als Malm bezeichnet wird, nun auch als hydrothermale Lagerstätte erkundet. Die Erkundung wird durch geophysikalische Messmethoden betrieben. Dabei werden besonders seismische Verfahren gewählt, die bereits für die Kohlenwasserstofferkundung erprobt wurden. Diese seismischen Messverfahren in dichtbesiedelten städtischen Gebieten durchzuführen, ist eine besondere logistische und technisch-methodische Herausforderung.

Seit 1998 findet die Wärme- und seit 2007 die Stromerzeugung aus bayerischen geothermischen Ressourcen des Malm im Molassebecken statt. Bis heute sind 279,2 MW Wärmeleistung in 19 Projekten und 34,9 MW Stromleistung in sieben Projekten in Bayern erschlossen; vier Stromkraftwerke sind bisher in Betrieb: Unterhaching, Sauerlach, Dürrnhaar und Kirchstockach (*Abbildung 1, rechts*).

Davon werden 14 Projekte von Kommunen, vier Projekte privat und ein Projekt privat-kommunal betrieben (Moeck und Zimmer, 2014). Wegweisend ist das erste interkommunale Projekt der AFK Geothermie GmbH. Hierbei teilen sich die drei Kommunen Aschheim, Feldkirchen und Kirchheim bei München

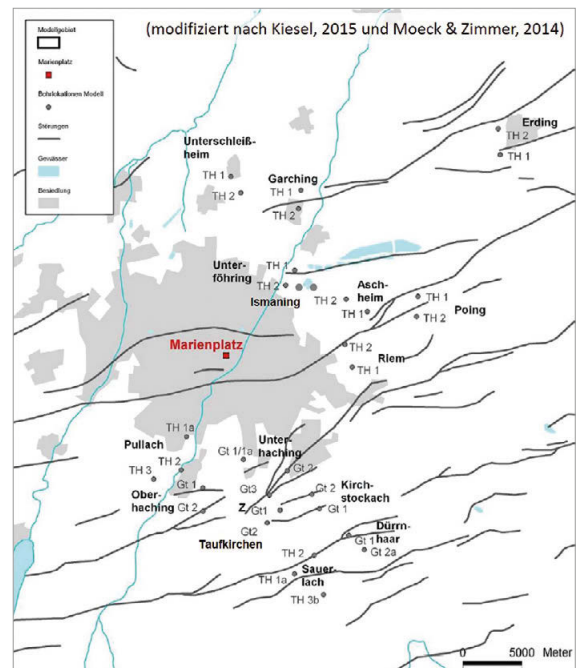
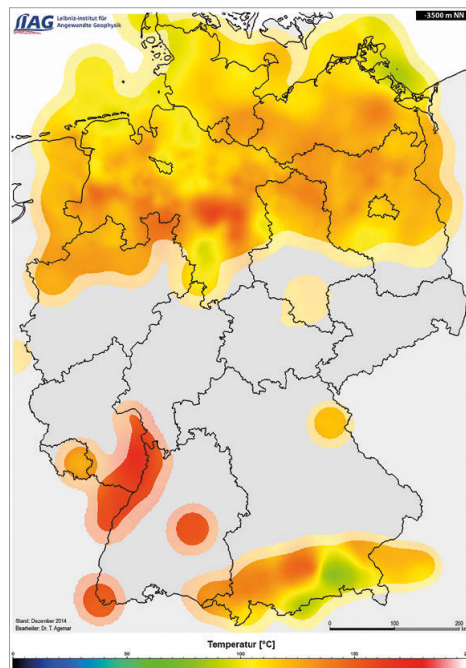


Leibniz-Institut für Angewandte Geophysik
Prof. Dr. Inga Moeck
inga.moeck@liag-hannover.de

ZAE Bayern
Dr. Jens M. Kuckelkorn
jens.kuckelkorn@zae-bayern.de

Abbildung 1
Links: **Temperaturkarte Deutschlands für den Tiefenbereich 3500 m unter NN aus dem Geothermischen Informationssystem Deutschlands, GeotIS (Agemar et al., 2014).**

Rechts: **Großraumregion München mit geologischen Verwerfungs- zonen im hydrothermalen Aquifer der Karbonate des Malm in 2000 bis 4000 m Tiefe (modifiziert nach Kiesel, 2015 und Moeck & Zimmer, 2014).**



eine Bohrungsdoulette (bestehend aus einer Förder- und einer Reinjektionsbohrung) zur Fernwärmeversorgung. Eine Vorreiterrolle nehmen die Stadtwerke München ein, die als Konzernvision die Umstellung der Wärmeversorgung auf 100% erneuerbare Energie bis 2040 genannt haben (Hecht und Pletl, 2015). Der Tiefengeothermie wird hier eine Schlüsselrolle zugeordnet, da allein aus Flächennutzungsgründen der jährliche Wärmebedarf der Münchner Fernwärme von 4 TWh nicht durch Wind, Sonne und Biomasse gedeckt werden kann (Greller, 2015).

Referenzprojekt

Das Tiefengeothermieprojekt der AFK Geothermie GmbH versorgt die fünf Ortschaften Aschheim, Dornach, Feldkirchen, Kirchheim b. M. und Heimstetten. Nach Gründung im Jahr 2008 wurde zunächst die Förderbohrung Th1 erfolgreich abgeteuft (Endteufe 2.621 m, Fördertemperatur >85°C, Schüttungsrate >77 l/s). Im Jahr 2009 konnte die Reinjektionsbohrung erfolgreich fertiggestellt werden, ebenso die Geothermiezentrale, eine Thermalwassertrasse und das Transportnetz. Dadurch konnte die Anlage bereits im Herbst 2009 in Betrieb gehen und die ersten Kunden versorgen. Im ersten Bauabschnitt wurden insgesamt rd. 34.000 m Rohrnetzleitungen verlegt, in den ersten 4 Jahren wurden rd. 1000 Kundenverträge abgeschlossen und weitgehend an das Fernwärmenetz angeschlossen.

Die Ziele des Projektes lassen sich folgendermaßen zusammenfassen:

- gemeinsame Gewinnung von klimaschonender und preiswerter Wärmeenergie
- regenerative Wärmeversorgung unabhängig von Tages- und Jahreszeit sowie Witterung
- keine Lärmemissionen
- geringe Freisetzung von klimaschädlichen CO₂-Äquivalent-Emissionen
- Minimierung fossiler Brennstoffe, niedriger Primärenergiefaktor
- komfortabel und hohe Preisstabilität
- Versorgungssicherheit, hohe Betriebssicherheit und zuverlässige Funktionalität
- beschleunigte Umsetzung der Energiewende gegenüber der Gebäudesanierung

Bei der Auslegung der Systemtemperaturen wurde das Fernwärmenetz mit Vorlauf 80°C/Rücklauf 55°C in der Grund- und Mittellast geplant. Die Optimierung der Wärme- und Temperaturverluste erfolgt durch schlanke Rohrdimensionierung, Dämmung und exergetisch günstige Hausübergabestationen. Die Hydraulik wurde passend für den zukünftigen Wärmebedarf der fünf Orte ausgelegt. Die Tiefengeothermie wird als Grundlast eingesetzt und fortwährend optimiert. Dabei wurde die Fernwärmerücklauf-temperatur als Wärmesenke von anfangs über 60°C inzwischen auf unter 52°C abgesenkt. In der von Jahr zu Jahr zunehmenden Mittellast wird zukünftig eine Absorptionswärmepumpe das Thermalwasser tiefer auskühlen. Ebenfalls soll 2016 ein BHKW im Winter den Eigenstrombedarf der Energiezentrale weitgehend decken.

Dies hat als Nebenwirkung zur Folge, dass das Stromnetz im Winter entlastet wird, im Sommer jedoch weiterhin der Strom aus dem Netz gekauft wird.

Letztlich kann eine Wärmewende mit der Geothermie nur zusammen mit Kommunen und Wärmekunden erfolgreich umgesetzt werden.

Schlussfolgerungen und Ausblick

Tiefengeothermie stellt eine klimaneutrale Grundlast für Fernwärme dar, es besteht aber noch Forschungsbedarf in vielen Bereichen der geothermischen Technologien, die nur im Betrieb getestet und verifiziert werden können. Bei der Investition stellen die Tiefbohrungen inklusive Vorerkundung den größten Kostenfaktor nach dem Fernwärmenetz dar. In der Metropolregion München ist der Ausbau der Tiefengeothermie besonders weit vorangeschritten. In anderen Bereichen Deutschlands müssen insbesondere Themen wie Verbesserung der Fündigkeit, nachhaltiger Betrieb und Korrosion durch die Forschung aufgegriffen werden. Die Geothermie darf als junge Technologie mit noch fehlender industrieller Reife in ihrer Entwicklung durch Gesetze nicht behindert werden, die beispielsweise auf die Schiefergaserschließung abzielen, oder die die Geothermie mit der Entwicklung anderer erneuerbarer Energien gleichsetzen.

Forschung sollte am besten praxisnah mit Anwendern zusammen im gesamten Bereich der geothermischen Technologien von Erkundung (Quantifizierung und Minimierung des Fündigkeitsrisikos), Erschließung, Planung und schrittweisen Umsetzung des Versorgungssystems (Effizienz, Kopplung mit anderen Energieträgern) bis hin zur Betriebsoptimierung durchgeführt werden.

Bisher stellen die Projekte eher individuelle Einzelvorhaben dar, daher ist eine wissenschaftliche Begleitung und ein Erfahrungsaustausch notwendig, um zukünftig einen Wissenstransfer zu ermöglichen.

Für einen optimalen Niedertemperaturbetrieb muss das Energiesystem, bestehend aus Wärmequelle, Verteilnetz und Energiebedarf, passgenau abgestimmt werden. Zentrale Systeme können in der Zukunft schneller angepasst werden als viele dezentrale Systeme. Der dabei auftretende Netzverlust wird durch die Geothermie abgedeckt. Auch können, energetisch gesehen, Geothermiesysteme wesentlich schneller umgesetzt werden als die energetische Gebäudesanierung. Ein effizienter Niedertemperaturbetrieb mit erneuerbaren Energien und KWK ist nur durch die genaue Auslegung und Anpassung von Bestandsnetzen durchführbar. Eine erfolgreiche Wärmewende kann also nur mit einer Ausbauoffensive von Fernwärmenetzen zusammen erfolgen.

Literatur

- Agemar, T., Alten, J., Ganz, B., Kuder, J., Kühne, K., Schumacher, S. & Schulz, R. (2014): The Geothermal Information System for Germany – GeotIS – ZDGG Band 165 Heft 2, 129–144
- Hecht, C., Pletl, C. (2015). Das Verbundprojekt GRAME – Wegweiser für eine geothermische Wärmeversorgung urbaner Ballungsräume. Geothermische Energie, Heft 82, 8–10
- Kiesel, J. (2015). Strukturgeologische Analyse des Markt Schwabener Verwurfs im Raum München Ost. Unveröffentl. Bachelorarbeit, Technische Universität München, Fakultät Bau Geo Umwelt, 47 Seiten
- Greller, M., (2015). Technischer und ökologischer Umbau der großen Wärmenetze. Praxisforum Geothermie, Beiträge, 26.–27. Oktober 2015, München
- Moeck, I., Zimmer, R. (2014). Tiefe Geothermie in Bayern: Installierte Leistung, Erlaubnis- und Bewilligungsfelder und Erkundung. Beitragsband zu „Der Geothermiekongress DGK 2014“, 11.–13 November 2014, Essen

Solare Wärme: Bedeutung, Potenzial, Forschungsaufgaben



ISFH
Dr. Federico Giovannetti
f.giovannetti@isfh.de

DLR
Prof. Dr. Robert Pitz-Paal
robert.pitz-paal@dlr.de

Fraunhofer ISE
Dr. Korbinian Kramer
korbinian.kramer@ise.fraunhofer.de

Dr. Wolfgang Kramer
wolfgang.kramer@ise.fraunhofer.de

Edo Wiemken
edo.wiemken@ise.fraunhofer.de

ZSW
Dr. Jann Binder
jann.binder@zsw-bw.de

ZAE
Manfred Reuß
manfred.reuss@zae-bayern.de
Dr. Thomas Beikircher
thomas.beikircher@zae-bayern.de

Viessmann Werke GmbH & Co. KG
Dr. Bernd Hafner
drhf@viessmann.com

Solvis GmbH & Co. KG
Helmut Jäger
hjaeger@solvis-solar.de

1. Solare Wärmeerzeuger: Stand und Perspektive

1.1. Solarthermie

Nach Schätzungen des Bundesverbandes Solarwirtschaft (BSW) haben im Jahr 2015 über zwei Millionen solarthermische Anlagen 7,5 TWh Wärme für die Bereitstellung von Trinkwarmwasser und für die Raumheizung produziert [1]. Die Verbreitung dieser schon lange am Markt etablierten Technologie bleibt aber deutlich unter den Erwartungen und der Zubau ist in den letzten Jahren rückläufig. Laut aktuellen Energieszenarien, die das Erreichen der geplanten Klimaschutzziele abbilden, soll die Wärmeproduktion durch Solarthermie im Jahr 2050 auf 70 bis 80 TWh/a (installierte Leistung von ca. 140 bis 160 GW) wachsen und damit einen bedeutenden Beitrag zur Transformation des deutschen Versorgungssystems leisten. Wenn sich aber der derzeitige Trend fortsetzt wird eine Steigerung auf nur ca. 20 TWh/a erwartet [2; 3] (*Abbildung 1*).

Diese schwache Ausbaudynamik lässt sich zum großen Teil in der gesamten Branche der erneuerbaren Wärmeerzeuger beobachten und zeigt die noch vorhandene Schere zwischen Plänen und Realität.

Die komplexe Frage der nachhaltigen Energieversorgung mit der Vielfalt an verfügbaren Möglichkeiten wird selten vom Markt basierend auf energetischen Kriterien beantwortet. Eine viel wichtigere Rolle spielen hingegen die Wirtschaftlichkeit und das Image der verschiedenen Alternativen sowie die gesetzlichen Rahmenbedingungen.

Als konkretes Beispiel können die Untersuchungen der Beratungsgesellschaft co2online zum Energieverbrauch von sanierten Wohngebäuden erwähnt werden. Wenn die starke Diskrepanz zwischen dem technischen Potenzial der betrachteten Maßnahmen und deren Erfolgen in der Praxis das wesentliche Ergebnis der Auswertungen darstellt, wird dabei aber auch gezeigt, dass Solarthermie signifikant besser abschneidet als weit verbreitetere Lösungen wie Dach- und Fassadendämmung oder Fenstertausch und in der Tat zu den höchsten Einsparungen führt (*Abbildung 2*).

Dieses Szenario verdeutlicht die Notwendigkeit von neuen Ansätzen und wirksamen Strategien, die gemeinsam von allen am Projekt Wärmewende beteiligten Akteuren erarbeitet werden müssen.

Unter diesen Voraussetzungen besteht eine wesentliche Aufgabe der Forschung darin, technische Lösungen zu entwickeln und zu untersuchen um die Kosten der Solaranlagen signifikant zu senken und allgemein ihre Akzeptanz zu erhöhen.

Neben der dringenden wirtschaftlichen Optimierung ist die Entwicklung neuer effizienterer Systeme, die einen hohen solaren Deckungsanteil des Wärmeverbrauchs ermöglichen, erforderlich. Im Vordergrund steht hier die Kombination mit der Komponente Wärmepumpe und mit konventionellen sowie alternativen Energiequellen (z. B. Umweltwärme, Strom aus Photovoltaik oder Wind).

Ebenso essenziell ist die Erschließung neuer Märkte. Im Wohnbereich sollen vor allem die Mehrfamilienhäuser viel stärker in den Fokus genommen werden: Sie bilden ca. 60% der Wohnfläche in Deutschland, solarthermische Installationen stellen aber bisher bei diesem Gebäudetyp die seltene Ausnahme dar.

Im industriellen Bereich sprechen günstige Lastverteilungen über das Jahr, Kostenreduktion durch Skaleneffekt und ein geschätztes technisches Potenzial von 16 TWh/a im Nieder- bzw. Mitteltemperaturniveau für den Einsatz solarthermischer Anlagen. Herausforderungen dabei sind die Heterogenität und Komplexität dieses Segmentes und insbesondere die hohen wirtschaftlichen Erwartungen der Industrie. Aufgaben der Forschung sind hier die Identifizierung von geeigneten Bereichen und allgemein Prozessen für die Integration, die Erarbeitung standardisierter Lösungen und die Mobilisierung der Branche mit erfolgreichen Demonstrationsprojekten.

Als zukunftsrelevante Anwendung wird schließlich die solare Unterstützung von Fern- und Nahwärmesystemen in den letzten Jahren verstärkt untersucht. Damit erweitert sich das Spektrum der Forschung von einzelnen Gebäuden auf Siedlungen, Quartiere oder gesamte Städte und die Zielgruppe der Kooperationspartner auf Energieversorger, lokale

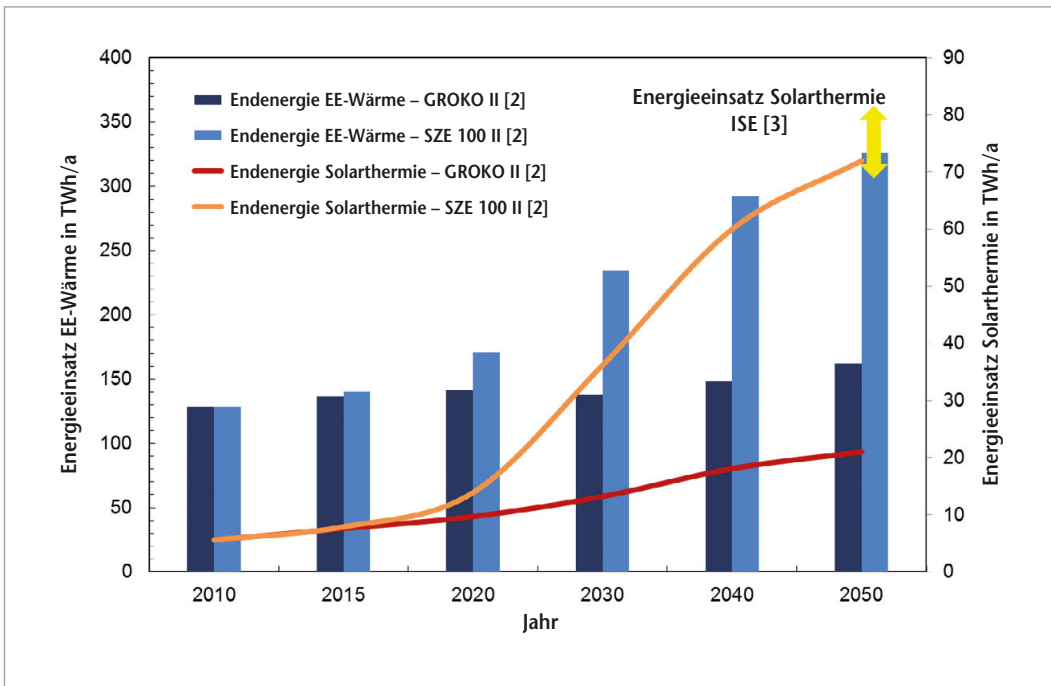


Abbildung 1
Entwicklung der Wärmeproduktion aus erneuerbaren Energien und Solarthermie
(Daten aus [2; 3])

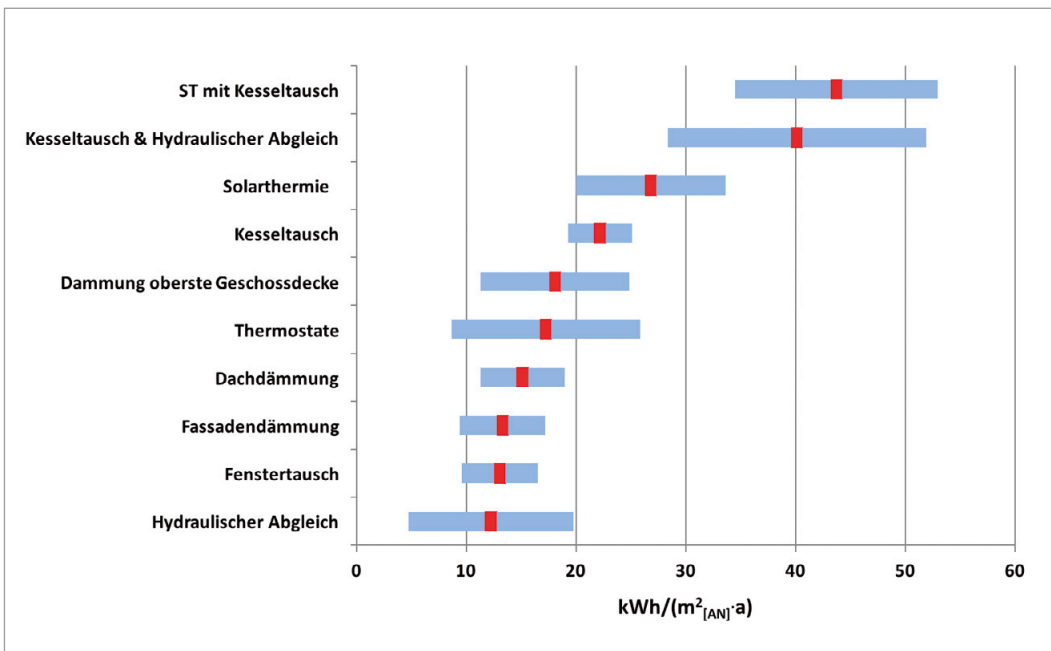


Abbildung 2
Heizenergieverbrauchs-minderungen nach wärmetechnischen Verbesserungen im Vergleich. Die blauen Balken entsprechen einem Konfidenzintervall von 95%.
(Quelle: Datenerhebung der Beratungsgesellschaft co2online)

Wärmenetzbetreiber und Kommunen. Als Vorbild und Motivation gelten die realisierten Installationen in Dänemark, mit Wärmegestehungskosten (ohne Förderung) unter 40 €/MWh. Vielversprechend ist dabei die Kombination mit strommarktgeführten Blockheizkraftwerken (KWK), weil sie bei steigendem Angebot aus erneuerbaren Quellen und entsprechend fallenden Strompreisen wirtschaftlich vorteilhaft mit solarer Wärme ergänzt werden können. Zu untersuchen ist hier die Übertragbarkeit

der skandinavischen Modelle auf Deutschland unter Berücksichtigung seiner unterschiedlichen Rahmenbedingungen (vorhandene Infrastrukturen, entsprechendes Temperatur- und Druckniveau, technische Vorschriften, etc.) bzw. die Entwicklung angepasster Lösungen, die einen wirtschaftlich vergleichbaren Betrieb ermöglichen.

Unabhängig vom thematischen Schwerpunkt ist neben Entwicklung und Test neuer Lösungen die

Prüfung deren Wirksamkeit in der Praxis unabdingbar. Die häufig festgestellten Abweichungen zwischen Erwartungen und Realität verlangen die Etablierung einer neuen Kultur der Feldtests an realen Objekten, die weit über die übliche Praxis der Demonstrationsanlagen geht und eine wissenschaftlich fundierte Begleitung benötigt.

1.2. Photovoltaik

Als Newcomer unter den solaren Wärmeerzeugern präsentiert sich seit einiger Zeit auch die Photovoltaik. Die starke Kostenregression hat dazu geführt, dass trotz niedrigerer Effizienz ihr Einsatz für die Bereitstellung von Wärme heute eine wirtschaftlich denkbare Alternative zu solarthermischen Anlagen darstellt. Die Senkung der Einspeisungsvergütung, die einfachere Installation sowie die Möglichkeit mit einer einzigen Technologie Strom- und Wärmebedarf abzudecken steigert die Attraktivität dieser Systeme, die sich bisher aber auf Einzelfälle im Wohnungsbau beschränken.

Ob die Photovoltaik einen signifikanten Beitrag im Wärmebereich spielen wird, hängt sehr stark von der zukünftigen Entwicklung der Branche und des gesamten deutschen Energieversorgungssystems ab. Die thermische Nutzung in großem Maßstab kann sich nur in einer fortgeschrittenen Ausbauphase ergeben, da Stromverbraucher (Haushalt, Gewerbe, Industrie und Mobilität) mit höherer Priorität bedient werden müssen. Die schon erwähnten Energie-szenarien rechnen mit einer installierten Leistung von ca. 100 bis 200 GW im Jahr 2050. Unter Berücksich-

tigung der aktuellen wirtschaftlichen und förderpolitischen Situation wird aber ein maximales Wachstum von den heutigen 40 GW auf knapp über 60 GW erwartet (*Abbildung 3*).

Durch neue Materialien, Konzepte und Prozesse zielt die Forschung auf eine Steigerung des Wirkungsgrads sowie auf eine weitere Senkung der Kosten (aktueller Trend bei Modulen: –20% bei einer Verdoppelung der installierten Leistung). Diese Entwicklungen werden die Konkurrenzfähigkeit der Photovoltaik sowohl für den Strom- als auch für den Wärmemarkt verstärken. Spezifisch für den Einsatz im Wärmesektor bestehen aber die wesentlichen Aufgaben der Forschung in der Erarbeitung konkreter Potenzialstudien und in der Entwicklung einer bisher kaum existierenden Systemtechnik.

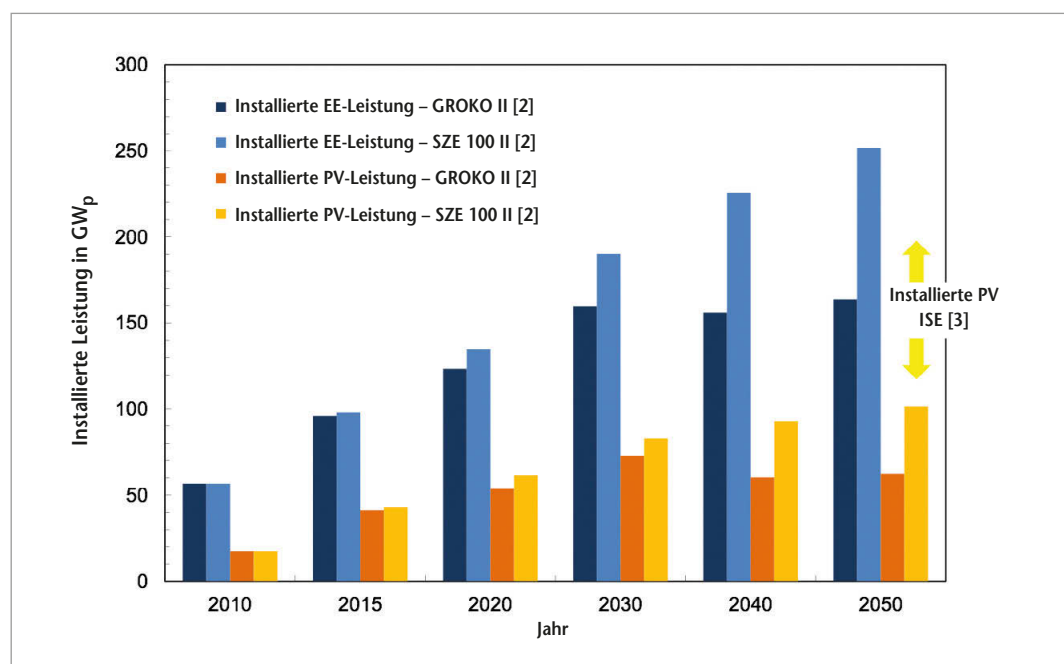
2. Laufende Forschungsaktivitäten

2.1. Kostensenkung und Akzeptanz

Aufgrund der Kosten- und Vertriebsstruktur solarthermischer Anlagen besteht heute das größte Senkungspotenzial weniger bei Kollektoren und Speichern, sondern vor allem beim Gesamtsystem durch Vereinfachung und Standardisierung. Hierzu werden im Forschungsverbund unterschiedliche Ansätze verfolgt.

Das Institut für Solarenergieforschung in Hameln (ISFH) setzt auf die Entwicklung von sogenannten „stagnationssicheren“ Kollektoren. Unter Stagnation

Abbildung 3
Installierte Stromleistung
aus erneuerbaren
Energien und PV
(Daten aus [2; 3])



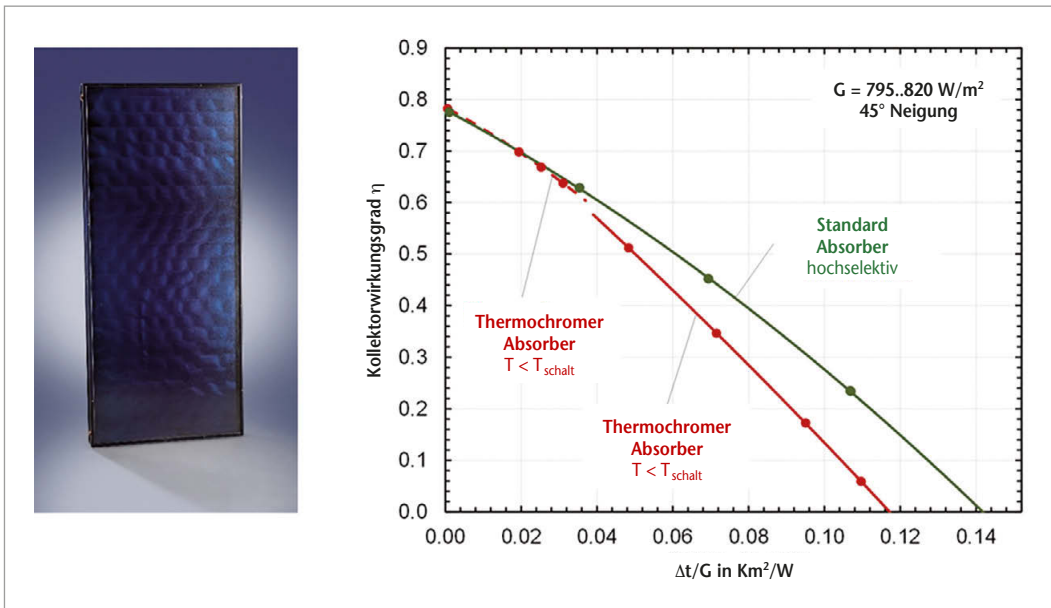


Abbildung 4
Flachkollektor mit thermochromem Absorber:
 Links: Kollektorprototyp
 Rechts: Wirkungsgrade von thermochromem und marktüblichem Kollektor im Vergleich.
 (Quelle: ISFH/Viessmann, Projekt TASK)

versteht man Überhitzung im System aufgrund von Störungen oder fehlendem Bedarf, die zu Temperaturbelastung und zu entsprechenden Beschädigungen der Komponenten im Solarkreis führt. Verbretete Maßnahmen zur Entschärfung dieser Problematik sind durchdachte hydraulische Auslegungen, Regelungsstrategien oder zusätzliche Kühlkörper im Solarkreis, die mit aufwendigerer Planung und höheren Kosten verbunden sind. Am ISFH werden zwei unterschiedliche Alternativen mit dem Ziel untersucht, die Dampfbildung im Solarkreis komplett zu unterbinden und damit zuverlässige, wartungsarme und günstigere Systeme zu realisieren. Nach ersten Schätzungen könnten damit bis zu 25% der Gesamtkosten gespart werden.

Der erste Ansatz beruht auf der Verwendung von Gravitationswärmerohren (Englisch: heat pipes), die schon lange bei Vakuumröhrenkollektoren neben direkt durchströmten Lösungen am Markt verfügbar sind. Durch geeignete Auslegung der Wärmerohre (Art und Füllmenge des Wärmeträgers) kann hier die Wärmeübertragung vom Absorber zum Solarkreis, die auf einem selbsttreibenden zweiphasigen Kreisprozess basiert, ab einer festzulegenden Temperatur unterbunden werden, was eine weitere Steigerung der Temperatur im System vermeidet. Nach ersten grundlegenden Untersuchungen an Einzelkomponenten sowie erfolgreiche Konzeption und Fertigung von Funktionsmustern, werden im Rahmen des laufenden Projektes „HP-KOLL“ (BMW, FKZ 0325550) in Kooperation mit den Industriepartnern Narva Lichtquellen und KBB Kollektorbau neuartige Flach- und Vakuumröhrenkollektoren entwickelt, die eine Begrenzung der Stagnationstemperatur im

Sammler und Fluidbereich auf 125 °C ermöglichen sollen.

Die zweite Lösung basiert auf dem Einsatz von Solarabsorbern mit thermochromen Beschichtungen. Thermochrome Absorber können ihre optischen Eigenschaften temperaturabhängig ändern: Im normalen Betrieb weisen sie eine Emissivität vergleichbar mit marktüblichen Produkten auf, beim Überschreiten einer Temperaturgrenze steigt die Emissivität und damit die Wärmeabstrahlung, was zu einer Reduzierung der maximal im Kollektor auftretenden Temperatur führt. Im abgeschlossenen Forschungsprojekt „TASK“ (BMW, FKZ 0325988) in Kooperation mit der Firma Viessmann wurden bisher nicht nur vielversprechende Laborergebnisse erreicht, sondern großformatige Absorber- und Kollektorprototypen entwickelt und charakterisiert. Wirkungsgradmessungen ergaben im ungeschalteten Zustand einen nahezu identischen Wirkungsgradverlauf wie für einen baugleichen Kollektor mit Standard-Absorber. Die Schaltung des Emissionsgrades auf Werte über 35% bei Temperaturen oberhalb von 65 °C bewirkt eine Reduzierung der Stagnationstemperatur von mehr als 30 K (Abbildung 4). Systemsimulationen einer Solaranlage für Trinkwarmwasser und Raumheizung zeigen, dass der thermochrome Kollektor einen vernachlässigbar niedrigeren Ertrag als der Referenzkollektor erreicht. Demgegenüber sinkt die Stagnationszeit um mehr als 70%. Das laufende Vorhaben „PROTASK“ (BMW, FKZ 0325858) zielt jetzt auf die Weiterentwicklung des neuen Absorbers, auf eine Optimierung des Produktionsverfahrens sowie auf die praxisnahe Bewertung des Kostensenkungspotenzials durch Untersuchungen am Gesamtsystem.

Einen ganz anderen Weg für die Reduktion der Systemkosten und die Steigerung der Akzeptanz stellt die Entwicklung von solarthermisch aktiven Gebäudehüllen dar. Eine aktuelle Studie des Fraunhofer ISE im Rahmen des Projektes „AktiFas“ (BMW, FKZ 0325536) hat Potenziale und Hindernisse der Gebäudeintegration analysiert sowie auf Basis realisierter Projekte konkret gezeigt, dass gebäudeintegrierte Kollektoren eine Einsparung von ca. 30% im Vergleich zu üblichen Aufdach-Installationen ermöglichen. Wenn bisherige Integrationen hauptsächlich auf die optimale Anpassung der Kollektoren an die baulichen Gegebenheiten setzen, geht die Entwicklung von solaraktivierten Komponenten der Gebäudehülle einen Schritt weiter in Richtung Integrationsgrad. Auf diesem Gebiet laufen zurzeit sowohl am ISE als auch am ISFH entsprechende Forschungsaktivitäten.

Das Fraunhofer ISE befasst sich mit der Entwicklung von durchströmbaren Bauteilen aus Ultrahochleistungsbeton (Ultra High Performance Concrete, UHPC), die statische, thermische sowie gestalterische Funktionalität aufweisen und unter anderem als Fassadenkollektoren verwendet werden sollen. Im abgeschlossenen Projekt „TABSOLAR“ (BMW, FKZ 03ET1117) wurde das Potenzial dieses Ansatzes durch grundlegende Materialuntersuchungen, strukturmechanische und thermische Simulationen gezeigt sowie erste Funktionsmuster hergestellt (Abbildung 5). Für die Fertigung der filigranen, Material sparenden aber gleichzeitig hochfesten Bauteile wurde das Membran-Vakuumentiefziehverfahren, ein innovativer Gießprozess, der hohe Flexibilität erlaubt, erfolgreich eingesetzt. In einem laufenden Anschlussvorhaben sollen jetzt die positiven Ergebnisse in Richtung Produktentwicklung geführt werden.

Dabei sind noch offene Fragestellungen zu bearbeiten, vor allem die Skalierung der Elemente auf praxisrelevante Größen, die Auslegung der hydraulischen Struktur, die Dampfdiffusion sowie die Gestaltung der Oberflächen (Beschichtungen, Struktur, Farbe). Es ist zudem geplant, ein Demonstrationsgebäude zu erstellen, das aus diesen neuartigen Fertigelementen besteht.

Am ISFH wird dagegen in den letzten Jahren intensiv an der thermischen Aktivierung von Glas und Verglasungen gearbeitet. Im laufenden Vorhaben „Solar Glas“ (BMW, FKZ 16KN014827) werden beispielweise solarthermische Module für hinterlüftete Glassfassaden entwickelt und untersucht. Die Aktivierung erfolgt dabei durch die Applikation geeigneter Wärmetauscher auf der Rückseite vollflächig emailierter Glasscheiben, die als Absorber fungieren, sodass sich die resultierten Solarpaneele von Standard-Paneele nicht unterscheiden (Abbildung 5). Durch die große Auswahl an Glassubstraten, -beschichtungen und -geometrien ermöglicht diese Lösung eine hohe Gestaltungsfreiheit und verspricht eine qualitativ hochwertige Architektur.

2.2. Neue Systemlösungen

Auf dem Weg zu zukünftigen „Nahe-Nullenergie-Gebäuden“ bietet die Solarenergie als Ergänzung zu Dämm- und Effizienzmaßnahmen unterschiedliche Möglichkeiten um einen sehr hohen Anteil des Wärmebedarfs regenerativ abzudecken.

Die solarthermische Lösung sieht vor, große Kollektorfelder mit großen Pufferspeichern und Niedertemperatur-Wärmeverteilungssystemen zu kombinieren. Für die Zusatzheizung können Öl-, Gas-, Pellets- und Stückholzheizungen sowie Wärmepumpen verwendet werden. Für die Wärmespeicherung lässt sich auch die Gebäudemasse vorteilhaft nutzen.

Abbildung 5
Solaraktive Gebäudekomponenten:
 Links: Funktionsmuster eines durchströmbaren Bauteils aus Ultrahochleistungsbeton
 (Quelle: Fraunhofer ISE)
 Rechts: Solarpaneel aus Glas
 (Quelle: ISFH)

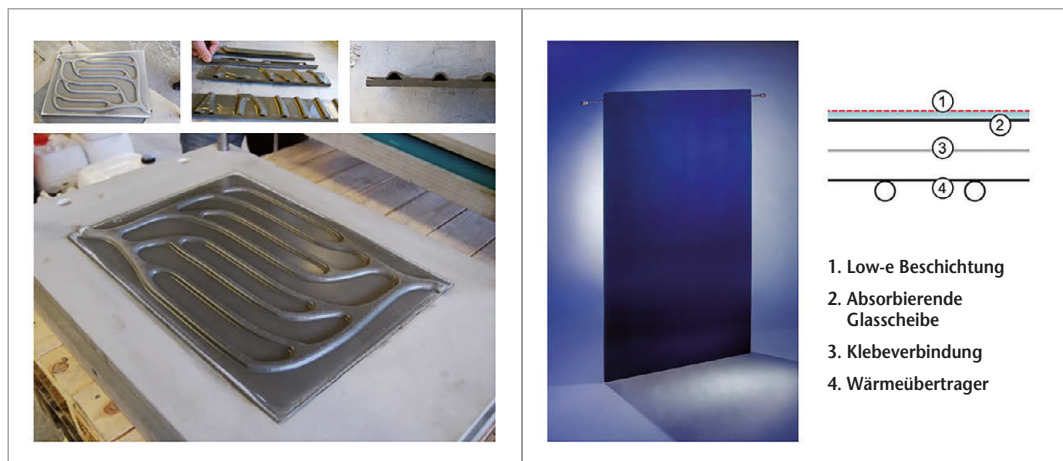




Abbildung 6
SolarAktivHäuser:
 neun Gebäude mit
 hohem solarther-
 mischem Deckungs-
 anteil untersucht im
 Rahmen des Projektes
 „HeizSolar“
 (Quelle: Fraunhofer ISE)

Im Rahmen des abgeschlossenen Projektes „HeizSolar“ (BMW i, FKZ 0325971) hat das Fraunhofer ISE im Konsortium mit SWT Stuttgart, TU Ilmenau und Sonnenhaus-Institut neun unterschiedliche sogenannte SolarAktivHäuser mit einem Deckungsanteil zwischen 50% und 100% experimentell und simulationstechnisch untersucht (Abbildung 6). Dabei wurde gezeigt, dass die energetischen Erwartungen weitgehend erfüllt werden und ermittelt, dass eine solare Deckung von 60% bei der aktuellen Förderung zu gleichen Kosten realisiert werden kann wie eine übliche Deckung von 30%. Auslegung und Installationen der Häuser sind heute sehr spezifisch und bei weitem noch nicht optimiert. Verbesserung der Konzepte, mit Schwerpunkt Anlagentechnik, und der Planung, Standardisierung und vor allem Generierung von Skaleneffekten bieten noch erhebliches Potenzial zur Kostensenkung, erfordern aber gleichzeitig verstärkte Forschungsanstrengungen.

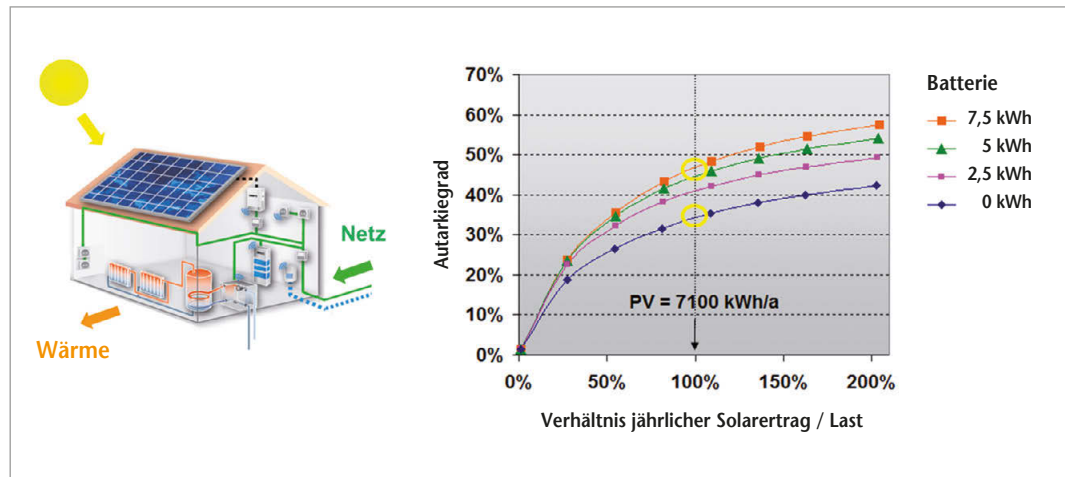
Nach dem photovoltaischen Ansatz werden dagegen PV-Stromüberschüsse, die aus der mangelnden Gleichzeitigkeit zwischen Erzeugung und Verbrauch für Haushaltgeräte resultieren, für die Wärmeerzeugung verwendet, um eine möglichst hohe Eigennutzung zu erzielen. Hierzu sind verschiedene Systemlösungen denkbar:

Das Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung (ZSW) in Baden-Württemberg hat die Kombination mit Wärmepumpe, thermischem und

elektrischem Speicher in Abhängigkeit von der Größe von PV-Anlagen und Speichern, dem Stromverbrauch sowie der Heizlast des Hauses analysiert. Die Ergebnisse der Studie zeigen, dass bei einer PV-Anlage von 5 bis 8 kW auf einem Ein- oder Zweifamilienhaus mit 4 Personen durch den Einsatz einer Wärmepumpe zur Raumheizung und Warmwasserbereitung der Eigenverbrauch von ~30% auf 40% beim Dämmstandard aus 2009 (angenommene Heizlast von 5 kW) und auf 65% für ein durchschnittliches Gebäude aus dem Jahr 1975 (niedriger Dämmstandard) erhöht werden kann. Wesentlich für die Erhöhung der Eigennutzung von Solarstrom ist ein thermischer Speicher von mindestens 600 Liter Kapazität und eine intelligente Regelung der Betriebszeiten der Wärmepumpe. Bei einer auf den Gesamtenergiebedarf abgestimmten PV-Anlagegröße betragen Eigenverbrauch und Autarkiegrad (solare Deckung des Strombedarfes durch Eigenverbrauch) 35% bis 40%, unabhängig vom Dämmstandard. Eine weitere Steigerung lässt sich nur durch den Einsatz von Batterien erreichen (Abbildung 7).

Erhöhte Eigennutzung von PV-Strom bietet nicht nur wirtschaftliche Vorteile, wie ein aktuelles Pilot-Projekt der Fa. Kramer GmbH in Kooperation mit dem Fraunhofer ISE zeigt. Hier wird ein innovatives Klimatisierungskonzept für mobile Wohn- und Arbeitsumgebungen untersucht, das auf eine aufwendige Netzeinspeisung verzichtet und einen optimalen Einsatz erneuerbarer Energien zur Entlastung der

Abbildung 7
Strom- und Wärmeversorgung mit Photovoltaik:
 Autarkiegrad eines modernen Gebäudes (KfW 75) mit PV und Wärmepumpe in Abhängigkeit von Anlagegröße und Kapazität der Batterie
 (Quelle: ZSW)



Energiekosten und zur Erhöhung der Nachhaltigkeit ermöglicht. Das Projekt setzt sich eine solare Deckung des Strombedarfs über 50% sowie eine vollständige Eigennutzung des PV-Stroms zum Ziel. Das Energiesystem besteht aus einer 3 kW PV-Anlage, einem 6.3 kWh elektrischen Speicher, einer 5.8/5.0 kW Split-Wärmepumpe zum Heizen und Kühlen sowie einer Steuereinheit für unterbrechungsfreies Umschalten zwischen Netz und Batterie. Die Anlage wurde im Frühjahr in Betrieb genommen, die Ergebnisse werden für Ende 2016 erwartet.

Zwischen dem rein photovoltaischen und rein solarthermischen Ansatz sind weitere sinnvolle Hybridlösungen denkbar, die auf der Nutzung von photovoltaisch-thermischen Kollektoren beruhen und untersucht werden sollen. Ebenso bei den Wärmepumpen-basierten Systemen sind unterschiedliche Optionen möglich. Allgemein ist anzumerken, dass eine effektive Kombination von Solarenergie und Wärmepumpen optimal aufeinander abgestimmte Komponenten sowie eine anspruchsvolle Regelung verlangt. Hierzu besteht noch erheblicher Entwicklungsbedarf.

2.3. Neue Märkte

Als repräsentatives Beispiel im Bereich Wärmenetze wird hier das Vorhaben „EnWiSol“ (BMW, FKZ 0325544) erwähnt. Dabei haben sich der Energiedienstleister Badenova WÄRMEPLUS und das Fraunhofer ISE mit Unterstützung der Stadt Freiburg zusammengeschlossen, um ein innovatives Wärmeversorgungssystem für das innerstädtische Neubaugebiet Gutleutmatte zu entwickeln, das Kraft-Wärme-Kopplung (KW) und dezentrale Solarthermie kombiniert. Die 2000 m² dachinstallierten Solaranlagen werden durch eine Regelstation an das Fernwärmenetz angeschlossen und sollen eine zeitweise Abschaltung des Netzes im Sommer erlauben:

Dadurch wird zum einen eine erhebliche Reduzierung der hohen sommerlichen Verteilverluste (ca. 50%) erzielt, zum anderen der schon heute aufgrund des Überschusses an erneuerbarem Strom unwirtschaftliche Betrieb der KWK vorteilhaft ergänzt. Das Quartier mit 500 Wohneinheiten befindet sich gerade im Bau und soll bis 2017 fertiggestellt werden.

Laufende Aktivitäten des FVEE im Bereich solare Prozesswärme werden im entsprechenden Beitrag dieses Tagungsbandes schon vorgestellt. An dieser Stelle wird über zwei Beispiele aus der Praxis berichtet, die erfolgreiche Ansätze zeigen:

Im ersten Projekt erproben die E.ON Mitte AG und die Fa. Enersolve die Nutzung von Wärme aus Solarthermie und Biomasse zur Erdgasvorerwärmung in einer Gasdruck-Regelanlage in Kirchhain-Großseelheim. Aufgrund des niedrigen Temperaturniveaus (20–40 °C) und des hohen sommerlichen Bedarfs soll hier eine Solaranlage bestehend aus 355 m² Flachkollektoren und 25 m³ Wasserspeicher in Kombination mit einer Biogas-KWK-Anlage eine regenerative Deckung von bis zu 80% erreichen. Der Betrieb im Wärmeliefer-Contracting durch die Fa. Enertracting GmbH gewährleistet einen konstanten Arbeitspreis von 55 €/MWh für die nächsten 15 Jahre.

Im zweiten Projekt dient Solarthermie dazu, neun Gewächshäuser für den Demeter Biogemüsehof Keßler zu heizen und zu entfeuchten. Die vorhandene Holzheizung wurde mit 960 m² Flachkollektoren und 50 m³ Pufferspeicher ergänzt. Auch hier sprechen die niedrigen Temperaturen (40°–70 °C) und die Lastverteilung über das Jahr für den Einsatz solarer Wärme: Bisherige Ergebnisse bestätigen die Erwartungen und zeigen eine vollständige sommerliche

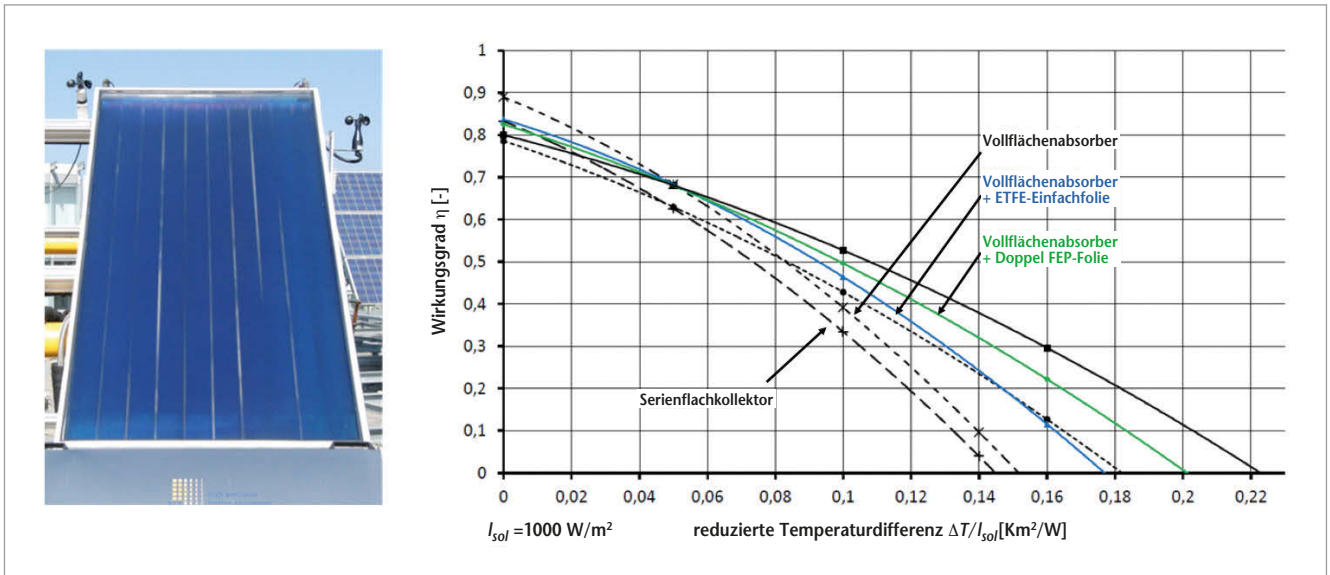


Abbildung 8
Flachkollektoren mit Mehrfach-Abdeckungen und Vollflächenabsorber: Ansicht eines Prototypen mit Doppel FEP-Folie (links) und gemessene Wirkungsgrade (rechts).
 (Quelle: ZAE Bayern)

Deckung des Wärmebedarfes. Besonders hervorzuheben sind im Projekt die Kosten der Installation, die mit 460 €/m² bei ca. der Hälfte von denen typischer Solarthermieanlagen liegen und damit das Kostensenkungspotenzial im Industriebereich beweisen.

In beiden zu erschließenden Marktsegmenten Wärmenetze und Prozesswärme herrschen oft Betriebstemperaturen oberhalb der heutzutage typischen Bereiche für den Einsatz solarthermischer Kollektoren. Neben der prioritären Erarbeitung von Integrationskonzepten und -systemen werden somit in laufenden Forschungsaktivitäten auch neue für diese Anwendungen geeignete solare Wärmeerzeuger entwickelt. Bei den Flachkollektoren liegt in den letzten Jahren der Fokus auf der Steigerung der Effizienz ab 60–80 °C bzw. auf der Reduzierung der Wärmeverluste.

Am Zentrum für Angewandte Energieforschung in Würzburg (ZAE Bayern) sind Flachkollektoren durch vollflächig durchströmte Absorber und Mehrfach-Abdeckungen auf der Basis von FEP- und ETFE-Folien verbessert worden (BMW, FKZ 0325987A). Abhängig vom Aufbau zeigen die Messungen an Echtgrößen-Prototypen eine Erhöhung des Wirkungsgrades auf bis zu 50% im Bereich solarer Prozesswärmeerzeugung (Delta T = 100 K, Einstrahlung = 1000 W/m², siehe *Abbildung 8*). Die Mehrkosten betragen dabei lediglich 10–25 €/m². Eine patentierte Vorrichtung gewährleistet eine faltenfreie und langzeitstabile Einspannung der Folien in nahezu jeden Serienkollektor. Derart optimierte Flachkollektoren weisen eine bessere Wirtschaftlichkeit als konzentrierende oder evakuierte Marktprodukte auf.

Das ISFH untersucht den Einsatz von für solarthermische Anwendungen angepassten Isolierverglasungen in Kooperation mit der Firma SOLVIS. Im Rahmen eines von der DBU geförderten Demonstrationsprojektes (FKZ 32455) sollen das Kollektorformat erweitert und die vielversprechenden Laborergebnisse im Feld nachgewiesen werden.

Am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) wird dagegen das Potenzial von Parabolrinnenkollektoren untersucht: Vorteilhaft werden dabei die höheren Erträge selbst im mitteleuropäischen Klima ab einer Temperatur von 100 °C geschätzt sowie die Möglichkeit, auftretende Stagnations- und Überhitzungsproblematik durch einfache Defokussierung zu vermeiden. Insbesondere in Kombination mit KWK können die Hochleistungskollektoren Wärme-Kraft-Prozesse direkt betreiben oder die solar erzeugte Wärme speichern, wobei die erhöhte Temperatur eine bessere Nutzung der Speicherkapazität erlaubt. Die wesentlichen Forschungsaufgaben liegen hier bei der Entwicklung vorgefertigter, montagefreundlicher Module, die den bisherigen Aufwand bei der Installation reduzieren können, sowie in der Systemintegration.

3. Fazit

Solarenergie kann einen wesentlichen Beitrag zur nachhaltigen Transformation unseres Wärmeversorgungssystems leisten, die Marktentwicklung der letzten Jahre zeigt aber eine unzureichende Ausbaudynamik. Damit das große vorhandene Potenzial erschlossen wird, sind neue effektivere Ansätze und

koordinierte Anstrengungen von allen am Projekt Wärmewende beteiligten Akteuren erforderlich.

Aufgabe der Forschung ist es, Wege zu zeigen, gemeinsam mit der Industrie geeignete Lösungen zu erarbeiten und in ihrer Wirksamkeit zu prüfen. Als aktuelle Schwerpunkte gelten die Kostensenkung, die Entwicklung neuer, effizienterer Systeme auch in Kombination mit anderen Technologien sowie die Erschließung neuer Märkte, wie die solare Unterstützung von Wärmenetzen und industriellen Prozessen.

Aufgabe der Politik ist die Erarbeitung wirksamer und konsistenter Instrumente, die passende Rahmenbedingungen für die Umsetzung schaffen.

4. Literatur

- [1] Bundesverband Solarwirtschaft e.V. (2015), Statistische Zahlen der deutschen Solarwärmebranche – Solarthermie (<https://www.solarwirtschaft.de>).
- [2] Nitsch J. (2014), GROKO – II: Szenarien der deutschen Energieversorgung auf der Basis des EEG-Gesetzentwurfs – insbesondere Auswirkungen auf den Wärmesektor. Studie im Auftrag des Bundesverbandes Erneuerbare Energien e.V. (<http://www.bee-ev.de>).
- [3] Henning H.-M., Palzer A. (2015), Was kostet die Energiewende? Wege zur Transformation des deutschen Energiesystems bis 2050. Studie des Fraunhofer ISE (<https://www.ise.fraunhofer.de>).

Effiziente Wärme aus Biomasse – Stand, Herausforderungen und Perspektiven

Wärme aus Biomasse ist die traditionelle erneuerbare Wärmequelle der Menschheit. Ausgehend vom offenen Feuer hat sich die Technik je nach Land und Anwendung sehr stark weiter entwickelt. Mittlerweile gibt es vielfältige Technologien für die verschiedensten Wärmeanforderungen mit verschiedensten Umweltstandards.

In Deutschland stammen knapp 90% der erneuerbaren Wärme aus Biomasse. Das entspricht knapp 11% des gesamten Wärmebedarfs Deutschlands [BMW 2015]. Global werden derzeit rund 10% der Wärme aus Biomasse gewonnen [Ren21 2014]. Damit stellt die Biomasse in vielen Ländern den größten Beitrag zur erneuerbaren Energieversorgung.

Im Zuge der Energiewende und der Minderung der globalen Treibhausgasemissionen wird sich auch die Rolle der Wärme aus Biomasse wandeln. In einer zukünftig vor allem auf Wind, Sonne und Umgebungswärme beruhenden Energieversorgung wird die Biomasse aufgrund ihrer vielfältigen Nutzungskonkurrenzen vor allem zur Energiesystemstabilisierung und in Anwendungen, in denen keine passenden erneuerbaren Alternativen zur Verfügung stehen, zum Einsatz kommen müssen. Dabei muss das Emissionsniveau einiger der heute verfügbaren Biomasse-Technologien noch deutlich gesenkt werden.

Bezüglich der derzeit genutzten Potenziale ergeben sich weltweit starke Unterschiede. In Deutschland ist ohne Importe von einer nur noch begrenzt möglichen Steigerung der energetisch genutzten Biomassemengen auszugehen. Das bedeutet auch, dass die Forschung im Bereich der Biomassenutzung deutlich stärker auf eine qualitative als auf eine quantitative Entwicklung ausgerichtet werden muss.

In der Kooperation aus Forschung und Unternehmen sind u. a. die im Folgenden vorgestellten technologischen Komponenten und Konzepte zu erforschen, zur Marktreife zu entwickeln und mittels geeigneter Flankierung durch die Politik in den Markt zu integrieren.

Wärme aus Biomasse heute

Ungefähr die Hälfte des Endenergieverbrauchs geht sowohl global [Ren21 2014] als auch in Deutschland [BMW 2015] auf die Wärmeversorgung zurück. Der Einsatz erneuerbarer Energieträger liegt global, ohne Berücksichtigung der unzureichend quantifizierbaren traditionellen Biomassenutzung (z. B. Dungeverbrennung) bei ca. 10% [Ren21 2014]. Biomasse ist mit einem Anteil von 87% die mit Abstand wichtigste erneuerbare Wärmequelle in Deutschland [BMW 2015].

Unbenommen der starken Entwicklung der Wärmenutzung aus KWK-Anlagen des letzten Jahrzehnts basierend auf gasförmigen Bioenergieträgern, dominieren die festen Bioenergieträger mit 75% den Bereich der Biowärme. 66% dieser festen Brennstoffe werden in Kleinf Feuerungsanlagen (unter 1 MW thermischer Leistung) eingesetzt [BMW 2015] (*Abbildung 1*).

Während in Deutschland, Österreich und der Schweiz vor allem Geräte mit einem überdurchschnittlichen technologischen Stand betrieben und verkauft werden, gibt es in vielen Regionen der Welt noch sehr einfache und emissionsintensive Anwendungen (offene Feuerstellen, einfache Öfen). Unabhängig davon gibt es auch in Deutschland einen erheblichen Sanierungsstau. Eine Auswertung von Daten des Schornsteinfegerhandwerks zeigt, dass ein nennenswerter Anteil der Biomassekessel in Deutschland vor über 15 Jahren in Betrieb genommen wurden (Bayern ca. 37% und Schleswig-Holstein 40%) [Rönsch 2015].

Insgesamt ist die Palette der technologischen Ansätze zur Wärmebereitstellung mittels Biomasse sehr umfangreich und vielschichtig – abhängig vom Anwendungsfall und den verfügbaren und eingesetzten Brennstoffen. Neben Anlagen für die Zubereitung von Speisen und zur Beheizung einzelner Räume (z. B. Herde, Kamine und Kaminöfen, Grundöfen) sind auch Biomassekessel ab einer Leistung von unter 4 kW bis deutlich über 1.000 kW auf dem Markt verfügbar. Dabei können die verschiedensten Biomassen eingesetzt werden, darunter Scheitholz, Holzpellets, Holzhackschnitzel und bisher in sehr geringem Umfang auch Agrarbrennstoffe (wie z. B.



DBFZ

Dr. Volker Lenz
volker.lenz@dbfz.de

Cornelia Rönsch
cornelia.roensch@dbfz.de

IZES

Dr. Bodo Groß
gross@izes.de

Fraunhofer IWES

Dr. Bernd Krautkremer
bernd.krautkremer@
iwes.fraunhofer.de

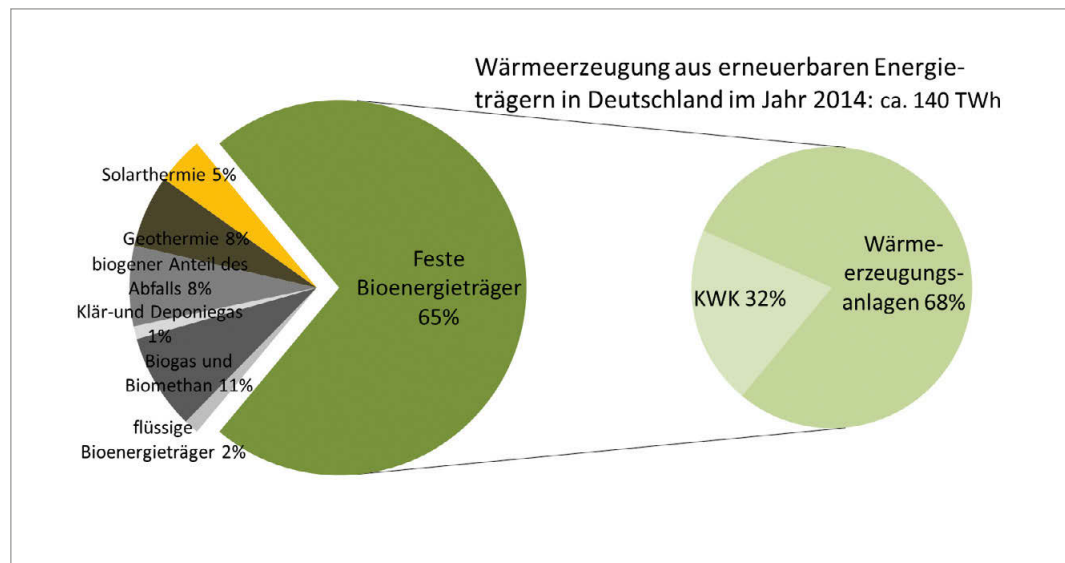
HDG Bavaria GmbH

Martin Ecker
Martin.Ecker@hdg-bavaria.com

ETE EmTechEngineering GmbH

Frank Werner
frank.werner@ete-ing.de

Abbildung 1
**Wärmebereitstellung
in Deutschland 2014**
(Quelle: BMWi, AGEE-Stat:
Erneuerbarer Energien, Stand
1.8.2015)



Miscanthus oder Stroh). Aufgrund unterschiedlicher Kundenwünsche, Umweltstandards und Zahlungsfähigkeiten sind nicht alle Produkte in allen Märkten uneingeschränkt absetzbar.

Für hochwertige deutsche Produkte ergeben sich immer dort besondere Exportchancen, wo anspruchsvolle Emissionsanforderungen gelten oder eingeführt werden oder ein Technologiepfad eine besondere Förderung erfährt (z. B. derzeit mittelgroße HHS-Kessel in Großbritannien).

Bei einem Bestand von ca. 10 Millionen Einzelraumfeuerungen für vor allem Stückholz und in deutlich geringerem Umfang Holzpellets [Schlichter 2015] und knapp 1 Millionen Biomassekessel [BWK 2015] in Deutschland gibt es einen jährlichen Absatzmarkt von rund 400.000 bis 450.000 Einzelraumfeuerungen [HKI 2015] und einen schwankenden Absatz in den letzten 10 Jahren von 15.000 bis 35.000 Biomassekesseln pro Jahr [BDH 2015]. Während im Pelletkesselbereich der Markt aktuell vergleichsweise stabil ist [DEPI 2015], klagen die HHS-Kesselhersteller über massive Absatzrückgänge in Deutschland.

Neben der Preiskonkurrenz zu Öl, Gas und Wärmepumpen stellen insbesondere auch die verschärften Staub-Grenzwerte der Verordnung über kleine und mittlere Feuerungsanlagen [1.BImSchV 2010] zusätzliche z. T. preisintensive Anforderungen an die Feuerungshersteller. Dabei haben die Entwicklung neuer Staubmessgeräte und die Erarbeitung verschiedenster Normen (DIN 4207-Reihe, DIN spec 33999, VDI 3670) mit zum Teil immer noch nicht gelösten Detailfragen zu einer nicht unerheblichen Verunsicherung bei Herstellern, Vertrieb und Kunden geführt. Mit einer seit 2015 verbesserten Förderung

im Rahmen des Marktanzreizprogramms versucht die Bundesregierung gegenzusteuern [MAP 2015].

Im Hinblick auf die Staub- und CO₂-Emissionen bewirkten die kontinuierlich steigenden Anforderungen der 1.BImSchV im deutschsprachigen Raum eine Entwicklung von Verbrennungstechnologien sowie von Staubabscheidern und Katalysatoren auch für Kleinf Feuerungsanlagen auf einem im weltweiten Vergleich hohen Umweltschutzniveau. Neben dem Altbestand tauchen trotzdem gerade bei Einzelraumfeuerungen, bei denen nur das Modell einmal auf dem Prüfstand getestet wird, immer wieder Diskrepanzen zwischen dem realen Emissionsverhalten im Feld und dem auf dem Prüfstand Ermittelten auf.

Im Bereich der Kraft-Wärme-Kopplung werden derzeit in Deutschland überwiegend größere Heizkraftwerke genutzt, die ihre Wärme in Wärmenetzen bzw. industriellen Anwendungen zur Verfügung stellen. Diese Anlagen dienen in erster Linie zur Bereitstellung von Wärme, Strom ist sekundär. Sie erreichen hohe Wärmenutzungsgrade.

In den letzten Jahren kamen auch kleinere KWK-Anlagen auf den Markt, die mittels der thermochemischen Vergasung feste Biobrennstoffe für die BHKW-Nutzung aufbereiten. Deren Fokus liegt zunächst auf der Stromproduktion. Eine effiziente Nutzung der Abwärme ist ab i. d. R. unabdingbar für die wirtschaftliche Darstellung dieser Prozesse [DBFZ 2013].

Nach Angaben der Fachagentur für nachwachsende Rohstoffen e. V. [FNR2015] wurden auf diesen Wegen ca. 8,7 TWh elektrischer Energie bereitgestellt.

Damit einhergehend müssten nach Berechnungen des Fraunhofer IWES deutlich über 25 TWh für den Wärmebereich bereitgestellt worden sein.

Die direkte Nutzung von Biogas und Bioöl in Heizungsanlagen hat in Deutschland kaum Bedeutung. Beide Brennstoffe werden und sollten auch weiterhin bevorzugt in Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen oder im Mobilitätsbereich eingesetzt werden.

Herausforderungen

Ausgehend von der zwingenden Notwendigkeit, den globalen Treibhausgasausstoß drastisch zu senken, ergeben sich in Umsetzung der Klimaschutzstrategie der Bundesregierung in Verbindung mit der generellen Anforderung, die Lebensgrundlagen der Erde zu erhalten, einige Herausforderungen für den Einsatz von Biomasse zu energetischen Zwecken:

- Biomasse ist begrenzt und wird zukünftig aufgrund einer steigenden Nachfrage nach Nahrung und Futtermitteln, Rohmaterialien für die stoffliche Nutzung und zu erwartender Einschränkungen der nutzbaren Flächen (z. B. Bebauung, Naturschutz) eher wertvoller und damit für die energetische Nutzung weniger verfügbar werden. In Deutschland gibt es noch ein gewisses Potenzial für eine zusätzliche Bereitstellung von Biomasse für energetische Zwecke, ohne auf massive Importe zurückgreifen zu müssen. Für eine vollständige Umstellung der Energieversorgung auf erneuerbare Energien reichen die Potenziale aber bei Weitem nicht aus (ca. 10 % des Primärenergieverbrauchs in Deutschland sind durch Bioenergie deckbar bei einem derzeitigen Anteil von etwas unter 8 %) [Thran 2015].
- Mit der notwendigen Effizienzsteigerung im Wohngebäudebereich (bis zu 80 % Einsparung durch Dämmung und kontrollierte Belüftung) [Bundesregierung 2010] und einem deutlichen Ausbau der Solarthermie, der Umgebungsenergie und der Wärme aus erneuerbarem Überschussstrom wird der durch Bioenergie bereitzustellende verbleibende Wärmebedarf je Objekt drastisch sinken. Entsprechend müssen die Nennleistungen von Biomassefeuerungen verringert oder mehrere Objekte zu einem Wärmeversorgungsverbund zusammengeschlossen werden (Nahwärmenetze). Diese Bündelung birgt einerseits das Potenzial einer weiteren Effizienzsteigerung und Emissionsminderung und sollte andererseits auch dazu genutzt werden, weitere feste Biobrennstoffe in die KWK-Anwendung zu überführen, um zusätzliche Systemdienstleistungen im Stromsektor erbringen zu können.
- Durch die Einsparung fossiler Kohlenstoffquellen im stofflichen Produktbereich werden zunehmend vor allem hochwertige Biomassequalitäten aus der energetischen Nutzung in die stoffliche Nutzung umgeleitet werden. Insofern werden zukünftig verstärkt Nebenprodukte, Reststoffe der Nahrungs- und Futtermittelproduktion sowie der stofflichen Verarbeitung von Biomassen und biogene Abfälle für die energetische Nutzung zur Verfügung stehen (Bioökonomie). Hier gilt es, die Technologie zur energetischen Nutzung den teilweise schwierigen Qualitäten anzupassen. Hier sind sowohl Methoden zur Aufbereitung der Biomassen als auch Techniken für eine saubere Verbrennung zu erforschen.
- Aufgrund des notwendigen Verzichts auf den Einsatz von fossilen Energieträgern wird in der Industrie und im Gewerbe zunehmend der Bedarf an Hochtemperaturwärme durch erneuerbare Wärmeoptionen und hier insbesondere Biomasse abgesichert werden müssen.
- Der bereits stattfindende Klimawandel wird zu einem erhöhten Bedarf an Kühlung (zumindest während immer häufigerer Hitzeperioden) und zu einem insgesamt verringerten Heizwärmebedarf bei u. U. ohne Gebäudedämmung unveränderten Spitzenbedarfen führen. In der Folge wird sich die Auslastung von Biomassefeuerungen verändern.
- Der Anspruch an eine saubere Umwelt wird tendenziell weiter steigen. Dies zeigt sich an den kontinuierlichen Grenzwertverschärfungen in der EU (ERP-Richtlinie für mittelgroße Heiz(kraft)werke) und Deutschland (1.BImSchV März 2010, TA Luft befindet sich aktuell in Überarbeitung), aber auch an der zunehmenden Diskussion der Folgen der Umweltverschmutzung in Ländern wie z. B. China.
- Bei allen Unwägbarkeiten und Diskussionen über die Versorgungssicherheit wird das Verlangen der Menschen nach Sicherheit und Geborgenheit (Selbstversorgung) eher zunehmen. Das heißt die Abhängigkeit vom Stromnetz oder leitungsgebundener Wärme wird gegebenenfalls stärker hinterfragt werden.

Diese Herausforderungen führen dazu, dass die energetische Biomassenutzung zukünftig deutlich stärker auf den Einsatz schwierigerer Brennstoffe in emissionsarmen und flexibel betreibbaren Anlagen fokussieren muss.

Ziel muss es sein, die nach Nutzung der anderen erneuerbaren Wärmeoptionen verbleibenden Wärmeversorgungslücken (zeitlich und örtlich) möglichst effizient zu schließen – und dies nicht nur im Neubaubereich sondern insbesondere auch im Altbestand.

Im Zusammenhang mit der steigenden Nachfrage nach Elektrizität und der zunehmenden Schwankungen aufgrund von Photovoltaik und Wind wird eine bedarfsgerechte, an die Wärmeversorgung angekoppelte Strombereitstellung an Relevanz gewinnen [RHC 2013, IWES 2015].

Insgesamt wird sich die Bioenergienutzung also von einer vor allem auf Quantität ausgerichteten Bedarfsdeckung über die Steigerung der Effizienz gepaart mit einer Verminderung der Emissionen zu einer das erneuerbare Energiesystem integrierenden Schlüsseltechnologie weiterentwickeln müssen: Smart Bioenergy [Thrän 2015].

Perspektiven

Die weitere Forschung und Entwicklung der Wärmebereitstellung aus Biomasse in der Transformation hin zur Smart Bioenergy lässt sich wie folgt abschätzen:

- **Kurzfristig (3–5 Jahre):**

Aufgrund der üblichen Produktentwicklungszeiten ist in diesem Zeitfenster lediglich eine wissenschaftlich unterstützte Weiterentwicklung und Verbesserung vorhandener Produkte möglich. Hierbei liegt das Augenmerk im Kleinanlagenfeuerungsbereich vor allem auf der Einhaltung der 2. Stufe der 1. BImSchV durch eine optimierte Feuerungen (primäre Maßnahmen), sowie integrierte und nachgeschaltete sekundäre Emissionsminderungseinrichtungen (Katalysatoren, Filter und elektrostatische Abscheider, katalytische Beschichtungen auf Filtern). Dabei hat die Forschung und Entwicklung der letzten Jahre in allen Bereichen deutliche Fortschritte erreicht (optimierter Brennraumaufbau, verbesserte Feuerungsregelungen mit CO/Lambda-Sensoren, marktreife Filtersysteme auch im kleinen Leistungsbereich, neuartige katalytische Materialien zur Integration der Katalysatoren in den Brennraum). Parallel wird die Sicherstellung durchgehend hoher Qualitäten der Brennstoffe Holzpellets und Holz hackschnitzel weiter verbessert. Durch die Verbesserung der Betriebsbedingungen von vorhandenen Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen auf Biomassebasis (Biogasanlagen und Holzvergaser-BHKW) in Verbindung mit vorhandenen oder neuen Nahwärmenetzen lassen sich kurzfristig deutliche Effizienzpotenziale bei der Wärmeversorgung heben.

- **Mittelfristig (5–10 Jahre):**

In der engen Zusammenarbeit zwischen Industrie und Forschung gilt es über gezielte Brennraumoptimierungen mittels CFD, verbesserte Kontroll- und Feuerungsregelung mittels verbesserter Sensoren

(z. B. CO/C_xH_y), die weitergehende Integration von sekundären Staub- und Emissionsminderungsmaßnahmen und der Entwicklung und Integration von zentralen Wärmeversorgungsverbundreglern sowohl die Emissionen zu mindern, als auch die Wärmeversorgungseffizienz im Gebäuden und Quartieren zu verbessern. Die Entwicklung von Auslegungs- und Sanierungsberatungswerkzeugen muss dazu beitragen, dass von den Endkunden die passenden Sanierungs- und Technologieentscheidungen je nach Einzelfall getroffen werden. Parallel ist die Nutzbarkeit von zunehmend inhomogeneren Biomassen durch eine kosteneffiziente, jedoch hochwertige Aufbereitung voranzutreiben (Sortieren, Waschen, Mischen, Kompaktieren).

Aufgrund der Vielfalt der Biomassen und der Anwendungsfälle werden sich neben der Nutzung von Hochqualitätsbrennstoffen in Systemen mit niedrigem Biomasseleistungsbedarf oder Klein(st)-Wärme-Kraft-Kopplungs-Anlagen in Kombination mit anderen erneuerbaren Energien auch Technologiepfade weiterentwickeln, die durch eine robuste Feuerung für minderwertige Biomassen und eine hochwertige Abgasreinigung gekennzeichnet sind (größere Leistung mit zentraler Einspeisung in Wärmenetze oder industrielle Anwendungen). Kraft-Wärme-Kopplungs-Anwendungen für feste Biomasse werden sich im Leistungsbereich von 20 bis 100 kWel noch stärker in die Eigenversorgung von größeren Objekten und Objektverbänden mittels eines flexiblen Betriebs einkoppeln müssen.

- **Langfristig (mehr als 10 Jahre):**

Perspektivisch ist Biomasse als speicherfähiger Energieträger mit einem hohen Reaktionstemperaturbereich von über 1000 °C zu wertvoll und auch zu kostenintensiv im Vergleich zu anderen erneuerbaren Energien um eine Wärmegrundlast bereit zu stellen. Daher muss zukünftig ein möglichst effektiver Einsatz erfolgen, d. h. zum Schließen von Wärmeversorgungslücken im Hochtemperaturbereich in der Industrie beziehungsweise den Lücken bei den Verbrauchern und das möglichst in Verbindung mit einer gleichzeitigen Stromnetzstabilisierung (Regelenergie). Hierzu sind heute von der Forschung die entsprechenden Klein- und Mikro-Wärme-(Kälte-) Kraft-Maschinen mit hoher Stromkennzahl und hoher Flexibilität zu untersuchen und zu entwickeln (*Abbildung 2*). Außerdem sind Wärme-Stromnetzverbundregler zu erforschen und innovative Bussysteme zu erdenken, die zukünftig eine einfache und weitgehend fehlerfreie Kombination verschiedener erneuerbarer Energiebereitsteller und der verschiedenen Verbraucher ermöglichen (Plug-and-Run). Diese Technologieansätze sind durch die Erforschung und Entwicklung geeigneter High-End-Brennstoffe mit

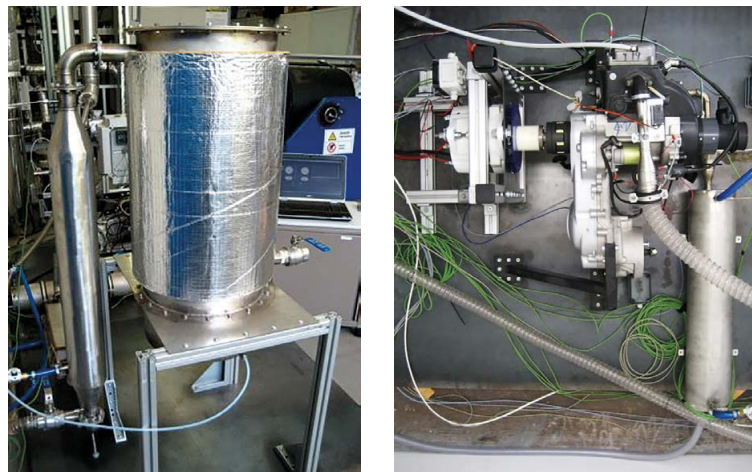


Abbildung 2
 Laborkonzept eines
 Holzkohlevergasers mit
 einfacher Gasreinigung
 und Moped-Motor im
 Leistungsbereich unter
 1 kWel
 (Dennis Krüger, DBFZ)

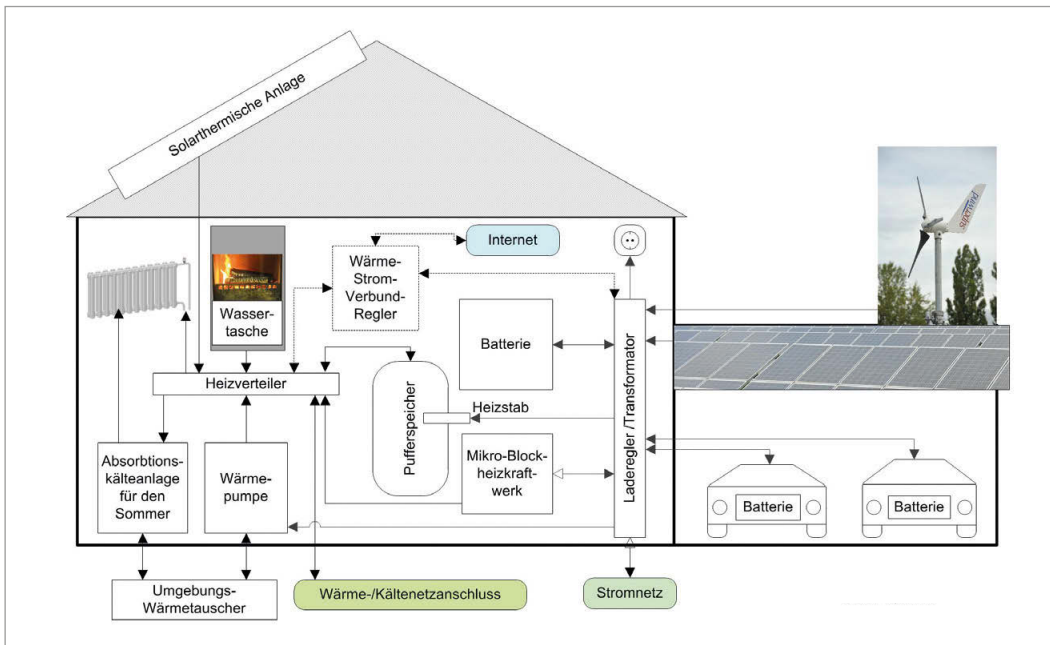


Abbildung 3
SmartBiomassHeat
Konzept:
 Übersicht der möglichen
 Komponenten
 (in der Umsetzung
 wird immer nur eine
 intelligente Auswahl
 dieser Komponenten
 eingesetzt)
 (© DBFZ, 2015)

hoher Homogenität für kleine Anlagenleistungen und kurze Betriebszeiten mit vielen Lastwechseln zu unterstützen (z.B. HTC, Torrefizierung).

Im Wärmebereich lassen sich diese Ansätze unter dem Begriff SmartBiomassHeat zusammenfassen (siehe [Abbildung 3](#)).

Für minderwertige Brennstoffe ist aber auch zukünftig der Einsatz in robusteren Anlagen mit hochwertiger Abgasreinigung denkbar. Im Sinne der SmartBioenergy müssen diese Anlagenkonzepte jedoch auch eine hohe Flexibilität bezüglich der Einsatzzeiten aufweisen und sich möglichst optimal in die jeweilige Wärme- und Strombedarfssituation einpassen.

Fazit

Die Zusammensetzung des erneuerbaren Wärmemixes wird in einer 100%-Erneuerbare-Energien-Welt deutlich höhere Anteile an Solarthermie, Umgebungswärme über Wärmepumpen und Abwärme sowie Überschussstromwärme aufweisen als heute. Trotzdem wird die Vielfalt der biogenen Lösungen auch in Zukunft wesentlich zu einer stabilen, sicheren und emissionsarmen Wärme-/Kälteversorgung der Gebäude beitragen können – insbesondere auch im Zusammenhang mit der energetischen Verwertung von anderweitig schwer nutzbaren biogenen Rest- und Abfallstoffen, sowie in Objekten mit hohem spezifischem Wärmebedarf bzw. bei industriellen

Anwendungen. Durch eine parallele Bereitstellung von Regelleistung und Residualstrom sollte die Biomasse-Wärme-Kälte-Kraft-Kopplung zu einer Stabilisierung des erneuerbaren Energiesystems aus dem Wärmebereich heraus beitragen (Smart Bioenergy).

Wichtige Maßnahmen und Entwicklungsschritte für die Wärmewende mit biogenen Brennstoffen sind:

- Effektive Forschung und Entwicklung zum Immissionschutz begleitet durch eine entsprechende Marktintegration mittels z. B. verstetigtem Marktanzreizprogramm.
- Waldholzzertifizierung mit Augenmaß, sodass auch zukünftig eine nachhaltige Nutzung der Wälder möglich ist.
- Systemintegration mit Bioenergie als Schlüssel für einen planvollen Umbau und eine sichere und kosteneffiziente EE-Wärmeversorgung:
- wissenschaftlich fundierte Planungs- und Beratungswerkzeuge
- kostengünstige und leicht verschaltbare Systemkomponenten (u. a. auch Wärmespeicher, einheitliches Kommunikationssystem)
- Verbundsystemregler und Verbundregelsysteme
- intelligente Integration von Emissionsminderungsmaßnahmen (wie Staubabscheider und Katalysatoren) in Wärmeerzeuger
- lokale/regionale Wärmeverbundsysteme vernetzt mit dem Stromsystem
- konsequenter und technologieoffener Umbau der Wärme- und Kälteversorgung auf EE auch im Gebäudebestand
- sozio-ökonomische Begleitforschung für einen zielgerichteten Umbau der Wärmeversorgung im Einklang mit der Akzeptanz der Bevölkerung

Literatur

[1. BImSchV 2010] Erste Verordnung zur Durchführung des Bundesimmissionsschutzgesetzes (Verordnung über kleine und mittlere Feuerungsanlagen – 1. BImSchV) vom 26.01.2010

[BMWi 2015] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie: Erneuerbare Energien in Zahlen. Nationale und internationale Entwicklung im Jahr 2014. URL: http://www.erneuerbare-energien.de/EE/Redaktion/DE/Downloads/erneuerbare-energien-in-zahlen-2014.pdf?__blob=publicationFile&v=3 (Stand: 21.10.2015).

[BDH 2015] Bundesverband der Deutschen Heizindustrie e.V. (BDH): Wärmetechnik Magazin. Heizungsmarkt, URL: <http://www.baulinks.de/heizung/heizungsmarkt.php> (Stand: 22.10.2015).

[Bundesregierung 2010] Bundesregierung Deutschland: Energiekonzept für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung. Berlin 28. September 2010. http://www.bundesregierung.de/ContentArchiv/DE/Archiv17/_Anlagen/2012/02/energiekonzept-final.pdf?__blob=publicationFile&v=5

[BWK 2015] Lenz, V., Naumann, K., Kaltschmitt, M., Janczik, S.: Erneuerbare Energien. In BWK Jahress Ausgabe 2015. Der Energiemarkt im Fokus. Bd. 67 Nr. 5. Springer. 2015

[DBFZ 2013] DBFZ et. al., Stromerzeugung aus Biomasse, 2013

[DEPI 2015] Deutsches Pelletinstitut GmbH (DEPI): Pelletfeuerungen in Deutschland. http://www.depi.de/media/filebase/files/infothek/images/Pelletfeuerungen_in_Deutschland.jpg (Stand: 04.12.2015)

[EU 2013] European Union: European Technology Platform on Renewable Heating and Cooling: Strategic Research and Innovation Agenda for Renewable Heating & Cooling. 2013

[FNR 2015] Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR): Basisdaten Bioenergie 2015

[HKI 2015] HKI Industrieverband: Absatz-Entwicklung 1990-2014 Häusliche Einzelfeuerstätten. URL: <http://www.ikz.de/nc/ikz-energy/news/article/der-hki-informiert-absatzzahlen-fuer-haeusliche-ein-0055140.html> (Stand: 22.10.2015).

[IWES 2015] Abschlussbericht zum Projekt „Flex HKW“ FKZ 03KB092A, noch nicht veröffentlicht.

[MAP 2015] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi): Richtlinie zur Förderung von Maßnahmen zur Nutzung erneuerbarer Energien im Wärmemarkt. Berlin, 11. März 2015

[Ren21 2014] REN21: Renewables 2014 Global Status Report. Paris: REN21 Secretariat. 2014

[Rönsch 2015] Rönsch, C.: Kleinf Feuerungsanlagen in Deutschland. Ergebnisse aus einer Erhebung mit dem Schornsteinfegerhandwerk. Vortrag auf dem 15. Internationalen BBE-Fachkongress HolzEnergie 2015 in Augsburg am 01./02. Oktober 2015.

[Schlichter 2015] Schlichter, M.: Aktuelle Erfahrungen aus der Überwachung von Kleinf Feuerungsanlagen, Vortrag auf der 19. Sitzung Arbeitskreis Holzfeuerung in Straubing am 20. Mai 2015.

[Thrän 2015] Thrän, D. (Hrsg.): Smart Bioenergy. Technologies and concepts for a more flexible bioenergy provision in future energy systems. Springer, Cham, Heidelberg, New York, Dordrecht, London. 2015

Der ForschungsVerbund Erneuerbare Energien Standorte der FVEE-Mitgliedsinstitute



FVEE-Geschäftsstelle

ForschungsVerbund Erneuerbare Energien (FVEE) • Renewable Energy Research Association
Büro Berlin-Mitte: Anna-Louisa-Karsch-Str. 2 • 10178 Berlin • Tel.: 030 288-7565-71
Büro Berlin-Adlershof: Kekuléstr. 7 • 12489 Berlin • Tel.: 030 8062-17138
E-Mail: fvee@helmholtz-berlin.de • www.fvee.de

Mitgliedsinstitute und Ansprechpartner



DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum gGmbH
www.dbfz.de
Torgauer Str. 116 • 04347 Leipzig
Paul Trainer: Tel. 0341/2434-437
paul.trainer@dbfz.de



DLR Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. in der Helmholtz-Gemeinschaft
www.dlr.de
Zentrum Köln-Porz • 51170 Köln
Dorothee Bürkle: Tel. 02203/601-3492
dorothee.buerkle@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
www.fz-juelich.de
52425 Jülich
Dr. Michael Czaperek: Tel. 02461/61-5450
info@fz-juelich.de



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

Standort Holzkirchen
Fraunhoferstraße 10 • 83626 Valley

Standort Kassel
Gottschalkstraße 28a • 34127 Kassel

Standort Nürnberg
c/o Energie Campus Nürnberg
Muggenhoferstraße 135 • 90429 Nürnberg



Fraunhofer ISE
Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE
www.ise.fraunhofer.de
Heidenhofstraße 2 • 79110 Freiburg
Karin Schneider: Tel. 0761/4588-5147
karin.schneider@ise.fraunhofer.de

Fraunhofer-Center für Silizium-Photovoltaik CSP
Walter-Hülse-Straße 1 • 06120 Halle

Technologiezentrum Halbleiternaterialien 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
www.iwes.fraunhofer.de

Institutsteil Kassel
Königstor 59 • 34119 Kassel
Uwe Krengel: Tel. 0561/7294-319
uwe.krengel@iwes.fraunhofer.de

Institutsteil Bremerhaven
Am Seedeich 45 • 27572 Bremerhaven
Britta Rollert: Tel. 0471/14290-220
info@iwes.fraunhofer.de



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



HZB Helmholtz-Zentrum Berlin
für Materialien und Energie
www.helmholtz-berlin.de

Lise-Meitner-Campus
Hahn-Meitner-Platz 1 • 14109 Berlin-Wannsee
Dr. Ina Helms: Tel. 030/8062-42034
info@helmholtz-berlin.de

Wilhelm-Conrad-Röntgen-Campus
Albert-Einstein-Straße 15 • 12489 Berlin-Adlershof

Institut für Silizium-Photovoltaik
Kekuléstraße 5 • 12489 Berlin-Adlershof

PVcomB
Schwarzschildstraße 3 • 12489 Berlin-Adlershof



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



IZES gGmbH
Institut für ZukunftsEnergieSysteme
www.izes.de/
Altenkesseler Straße 17 • 66115 Saarbrücken
Michaela Schlichter: Tel. 0681/9762 173
schlichter@izes.de



WI Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH
www.wupperinst.org
Döppersberg 19 • 42103 Wuppertal
Dorle Riechert: Tel. 0202/2492-180
info@wupperinst.org



ZAE Bayerisches Zentrum für
Angewandte Energieforschung e.V.
www.zae-bayern.de
Magdalene-Schoch-Str. 3 • 97074 Würzburg
Marina Leibold: Tel. 0931/70564-204
pr@zae-bayern.de

Standort Garching
Walther-Meißner-Straße 6 • 85748 Garching

Standort Erlangen
Haberstraße 2a • 91058 Erlangen

Standort Nürnberg
Fürther Straße 250 • 90429 Nürnberg

Standort Hof
Unterkotzauer Weg 25 • 95028 Hof



ZSW Zentrum für Sonnenenergie- und
Wasserstoff-Forschung Baden Württemberg
Gemeinnützige Stiftung
www.zsw-bw.de
Industriestraße 6 • 70565 Stuttgart
Claudia Brusdeylins: Tel. 0711/7870-278
info@zsw-bw.de

Standort Ulm
Helmholtzstraße 8 • 89081 Ulm

Impressum

Themen 2015

Forschung für die Wärmewende

Herausgeber

ForschungsVerbund Erneuerbare Energien (FVEE)

Renewable Energy Research Association

Büro Berlin-Mitte: Anna-Louisa-Karsch-Str. 2 • 10178 Berlin • Tel.: 030 288-7565-71

Büro Berlin-Adlershof: Kekuléstr. 7 • 12489 Berlin • Tel.: 030 8062-17138

E-Mail: fvee@helmholtz-berlin.de • www.fvee.de

Redaktion

Petra Szczepanski

Franziska Wunschick

Dr. Niklas Martin

Förderung

Der ForschungsVerbund Erneuerbare Energien

wird durch diese Ministerien gefördert:

- BMWi
- BMBF
- BMUB
- BMEL

Layout, Grafik

Hoch3 GmbH – Design- und Werbeagentur

Druck

Bonifatius GmbH – Druck | Buch | Verlag

Berlin, Mai 2016

ISSN • 0939-7582





FVEE ForschungsVerbund
Erneuerbare Energien
Renewable Energy Research Association

Büro Berlin-Mitte: Anna-Louisa-Karsch-Str. 2 • 10178 Berlin • Tel.: 030 288-7565-71

Büro Berlin-Adlershof: Kekuléstr. 7 • 12489 Berlin • Tel.: 030 8062-17138

E-Mail: fvee@helmholtz-berlin.de • www.fvee.de