

FVEE-Themen



Forschung für die Wärmewende – klimaneutral, effizient und flexibel

Beiträge zur FVEE-Jahrestagung 2022



Veranstalter

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



FVEE • Themen 2022

Forschung für die Wärmewende – klimaneutral, effizient und flexibel

Jahrestagung 2022

des Forschungsverbunds Erneuerbare Energien

12. und 13. Oktober 2022

Umweltforum Berlin • Pufendorfstr. 11 • 10249 Berlin

Wissenschaftliche Leitung

Prof. Dr. Michael Nelles • DBFZ

Prof. Frank Baur • IZES

Programmkomitee

DBFZ

- Dr. Volker Lenz
- Prof. Dr. Michael Nelles

DLR

- Dr. Sandra Sanok

Fraunhofer IEE

- Dr. Dietrich Schmidt

Fraunhofer ISE

- Dr. Georg Krugel

GFZ

- Daniel Acksel

HZB

- Dr. Tobias Sontheimer

ISFH

- Peter Pärisch

IZES gGmbH

- Prof. Frank Baur
- Patrick Hoffmann
- Bernhard Wern

FZ Jülich

- Dr. Leander Kotzur

KIT

- Prof. Dr. Jochen Linßen
- Prof. Dr. Joachim Knebel
- Prof. Dr. Eva Schill

UFZ

- Dr. Matthias Jordan

Wuppertal Institut

- Dietmar Schüwer

ZAE Bayern

- Dr. Hans-Peter Ebert
- Dr. Bastian Büttner

ZSW

- Andreas Püttner



Veranstalter

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

■ Einführung

5 **Forschung für die Wärmewende – klimaneutral, effizient und flexibel**

Prof. Dr. Michael Nelles • DBFZ

Prof. Frank Baur • IZES

■ Wärmewende Quo vadis?

6 **Wärmewende in der Forschungsinitiative Energiewendebauen**

Anna Bur • IZES

Florian Noll • IZES

11 **Klimaneutrale Wärmeversorgung – Bedeutung für die Energiewende und Herausforderungen bei Technik, Wirtschaftlichkeit und Regulierungen**

Dr. Peter Schossig • Fraunhofer ISE

■ Wärmewende in der Gesellschaft

16 **Gesellschaftliche Akzeptanz der Wärmewende**

Dr. Matthias Jordan • UFZ

Prof. Dr. Daniela Thrän • UFZ

23 **Lösungsansätze für die schnelle Umstellung von 20 Mio. Einzelgebäudeheizungen von fossil auf erneuerbar**

Dr. Volker Lenz • DBFZ

■ Wärmekonzepte für Kommunen und Industrie

30 **Multikriterielle Nachhaltigkeitsbewertung im Rahmen kommunaler Wärmetransformationskonzepte**

Prof. Dr. Katharina Gapp-Schmeling • IZES

35 **Umsetzung der urbanen Wärmewende im Quartier**

Dr. Dietrich Schmidt • Fraunhofer IEE

39 **Transformation in der Industrie: Herausforderungen und Lösungen für erneuerbare Prozesswärme**

Dietmar Schüwer • Wuppertal Institut

■ Aktuelle Forschungsfragen

- 47 Wärmepumpen machen Umweltwärme in Gebäuden nutzbar – der Schlüssel zu einer nachhaltigen Wärmeversorgung**
Fabian Hüsing · ISFH
- 54 Rolle thermischer Speicher im zukünftigen Energiesystem**
Dr. Stefanie Tafelmeier · ZAE
- 60 Sichere Erschließung tiefer Erdwärmequellen als Beitrag zur Wärmewende**
Prof. Dr. Hannes Hofmann · GFZ
- 65 Systemdienliche Wärmeversorgung aus Biomasse**
Dr. Nora Szarka · DBFZ

■ Wärmeversorgung der Industrie

- 74 Industrielle Prozesswärme im Kontext eines treibhausgasneutralen Energiesystems**
Felix Kullmann · FZ Jülich
- 78 Prozesswärme mit konzentrierender Solarthermie und Hochtemperatur-Wärmepumpen**
Dr. Panagiotis Stathopoulos · DLR
- 82 Neuartige Katalysatoren für nachhaltige, wärmeintensive Industrieprozesse**
Dr. Steffi Hlawenka · HZB
- 86 Hochtemperatur-Wärmespeicher – der Schlüssel zu erneuerbarer und bedarfsgerechter Industrierwärme**
Prof. Dr. Annelies Vandersickel · DLR

■ Wärmeversorgung des Gebäudesektors

- 90 Neubau und Transformation hocheffizienter Wärmenetze im Kontext der Dekarbonisierung und Flexibilisierung unserer Energiesysteme**
Dr. Anna Marie Cadenbach · Fraunhofer IEE
- 96 Wärmenetz-gekoppelte Speicherung im tiefen Untergrund**
Prof. Dr. Eva Schill · KIT
- 102 Wärmepumpen – aktuelle Entwicklungen und Lösungen für den Gebäudebestand**
Dr. Constanze Bongs · Fraunhofer ISE
- 108 Gebäudebestand der Zukunft – Smarte Energieeffizienz**
Dr. Bastian Büttner · CAE

Einführung

Forschung für die Wärmewende – klimaneutral, effizient und flexibel

Der Wärmesektor ist für über die Hälfte des Endenergiebedarfs verantwortlich – und damit auch für einen erheblichen Teil der klimaschädlichen Emissionen. Für eine erfolgreiche Energiewende muss dringend die Aufholjagd bei der Wärme beginnen.

Auf der Jahrestagung des Forschungsverbunds Erneuerbare Energien (FVEE) diskutierten die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler die Treiber und Hemmnisse der Wärmewende und präsentierten neue Denkansätze und Technologien, mit denen die Wärmewende technisch, wirtschaftlich und politisch umgesetzt werden kann.

Die Beiträge der FVEE-Jahrestagung 2022 untersuchen die Entwicklungspotenziale einzelner Technologien zur Wärmebereitstellung, stellen zahlreiche innovative Projekte vor, die den Wärmebedarf von Gebäuden und Industrie aus erneuerbarem Strom, Geothermie und Biomasse versorgen. Weitere Beiträge berichten über den aktuellen Forschungsstand bei thermischen Speichern, Niedertemperaturnetzen und intelligenten Regelungstechnologien.

Darüber hinaus gibt es Beiträge zur gesellschaftlichen Akzeptanz des notwendigen Wandels, zur Digitalisierung des Wärmesektors und zu den Anforderungen an das Bau- und Genehmigungsrecht.

Dank

Wir danken allen Autorinnen und Autoren für ihre Beiträge und dem Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft für die Förderung der Tagung.



Prof. Dr. Michael Nelles
Wissenschaftliche Tagungsleitung
DBFZ
michael.nelles@dbfz.de



Prof. Frank Baur
Wissenschaftliche Tagungsleitung
IZES
baur@izes.de

Wärmewende in der Forschungsinitiative Energiewendebauen

Überblick über aktuelle Forschungsvorhaben von FVEE-Mitgliedern



IZES
Anna Bur
bur@izes.de

Einleitung

Die Forschungsinitiative Energiewendebauen (EWB) ist Teil der Energiewendeforschung im Gebäude- und Quartiersbereich des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz.¹ Die Wissenschaftliche Begleitforschung Energiewendebauen ist Teil dieser Forschungsinitiative. Zu ihren Aufgaben gehört es, die Forschungsvorhaben und deren Ergebnisse auf der Metaebene zusammenzufassen und aktuelle Entwicklungen und Trends aufzuzeigen. Aktuell forschen zehn Mitgliedseinrichtungen des FVEE in der Forschungsinitiative Energiewendebauen. Als Konsortialleitung oder Forschungspartner*in tragen sie in 62 Forschungsvorhaben dazu bei, die Wärmewende- und Klimaschutzziele erreichbar zu machen.



Florian Noll
noll@izes.de

Eigens für den FVEE wurden diese zu ihren derzeitigen Forschungsthemen, ihrem Beitrag zur Wärmewende, ihren bereits erlangten Erkenntnissen sowie ihrem weiteren Forschungsbedarf durch die Wissenschaftliche Begleitforschung (IZES) befragt. Durch eine qualitative und computergestützte Inhaltsanalyse wurden die Fragen ausgewertet, um daraus den gegenwärtigen Überblick zusammenzustellen und in die Forschungsinitiative Energiewendebauen einzuordnen. In diesem Beitrag werden die Ergebnisse der Befragung zusammengetragen.²

FVEE-Institute und deren EWB-Projekte³

Insgesamt entfallen auf die an der Befragung teilgenommenen FVEE-Forschungsteilvorhaben 37 Mio. Euro an Fördergeldern (bewilligte Summe). Dabei entfallen 70% der genannten Summe auf den Forschungsschwerpunkt „Gebäude“ und 30% auf den Schwerpunkt „Quartiere“.

Der thematische Fokus der Gebäudeforschung liegt verstärkt auf einzelnen Komponenten (Fassaden, PV(T), Wärmepumpen etc.) sowie auf der Anlagen- bzw. Betriebsoptimierung. Dabei wird vor allem die Funktionsweise von Komponenten und deren Integration in Systeme beforscht.

Forschungsvorhaben im Quartierbereich befassen sich mit Wärmeversorgung und Wärmenetzen sowie Kollektoren und Großanlagen zur Dekarbonisierung von Quartieren. Zudem werden Aspekte des Nutzenden integriert, um einerseits den Komfort des / der Einzelnen und andererseits das Nutzendenverhalten zu analysieren.

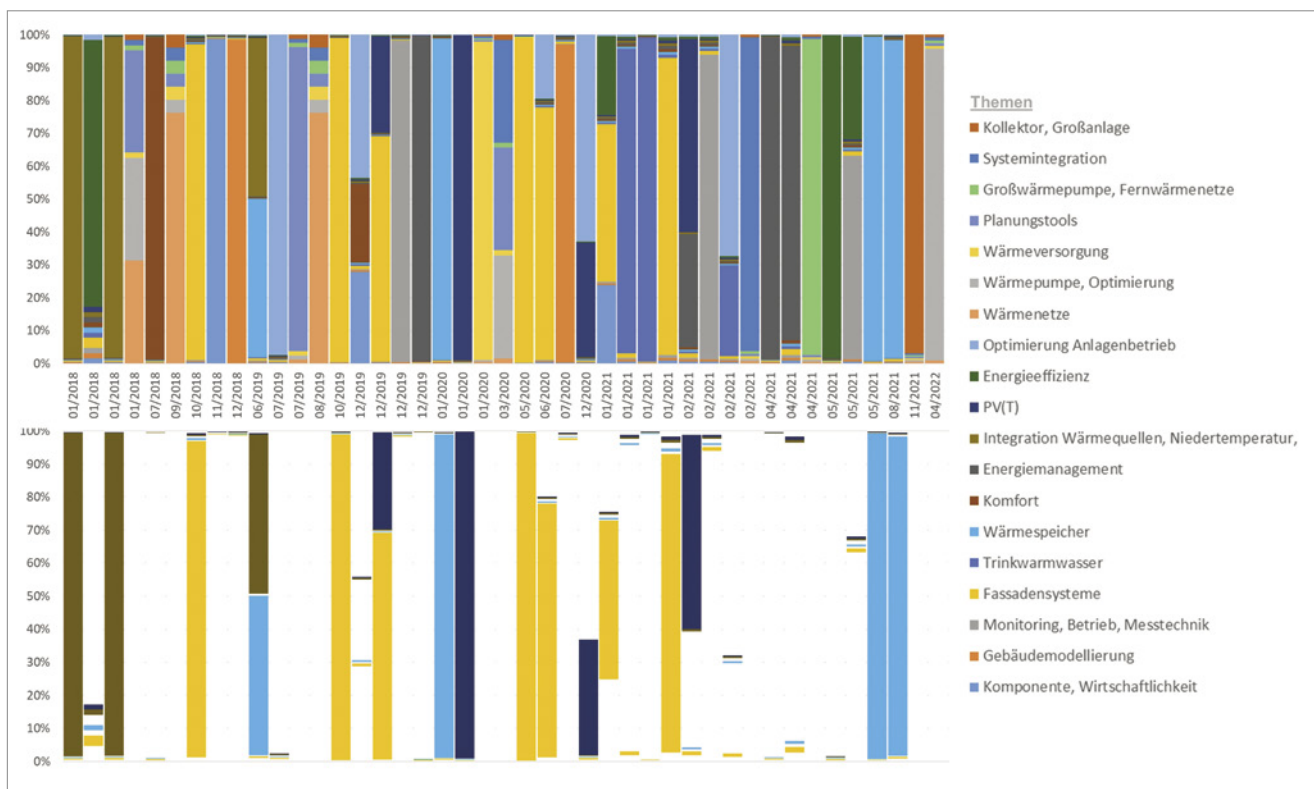
Mittels computergestützter Inhaltsanalyse konnten 19 Themenfelder innerhalb der gegebenen Antworten (13 Gebäude & 6 Quartiere) identifiziert werden, die sich unterschiedlich auf die einzelnen Forschungsvorhaben verteilen (► *Abbildung 1 oben*).

Im zeitlichen Verlauf können unterschiedliche Forschungsschwerpunkte aufgezeigt und somit in der Retrospektive Trends angegeben werden. Die Beforschung von Fassadensystemen durch die FVEE-Institutionen beispielsweise begann Ende 2018 und verstärkte sich bis hin zum Jahresanfang 2021. Danach wurden mehrere Projekte mit dem Fokus auf Wärmespeicher bewilligt (► *Abbildung 1 unten*).

Wärmewende: Erkenntnisse und Forschungsbedarfe

Der Beitrag zur Wärmewendeforschung der Institute ist vielfältig und zeigt das breite Themenspektrum. Ähnlich wie die thematische Fokussierung kann auch im diesem Bereich ein Schwerpunkt auf der Komponentenentwicklung identifiziert werden. Zudem gibt es verstärkt Forschungsaktivitäten in den Bereichen Infrastruktur, Akteur*innen und Gesamtsystem.

Forschung und Entwicklung im Bereich der Komponenten beziehen sich auf die Schwerpunkte Reduzierung des Wärmeverlustes (Fassade, Fenster etc.) oder auf die Produktion von Wärme (Wärmepumpe, PVT, Parabolrinnenkollektoren etc.). Zusätzlich zur Komponentenentwicklung werden Möglichkeiten erforscht, wie diese in bestehende Anlagenkonzepte integriert oder ihr Betrieb optimiert werden kann. Dieser Forschungsbereich hat eine große Überschneidung mit dem Bereich Infrastruktur, denn



die Einbindung von Anlagen in bestehende Netze zur Wärmeversorgung im Einzelgebäude oder im Quartier ist von großer Bedeutung. Des Weiteren gibt es Forschungsvorhaben, deren Erkenntnisinteresse in der Betrachtung des gesamten Energiesystems liegt, um dabei Möglichkeiten der Sektorkopplung und Systemintegration zu analysieren (► *Abbildung 2*).

Beispielhaft können bereits einzelne Ergebnisse zu den jeweiligen Kategorien hervorgehoben werden. Dabei spiegeln diese die positiven Eigenschaften

der beforschten Technologien und Komponenten sowie der Einsatzmöglichkeiten wider. Zudem werden Ergebnisse hervorgehoben, deren Einsatz für Bestandsgebäude möglich ist.

In Bezug auf die Wärmewende sehen verschiedene Forschungsvorhaben die Kommunen als zentrale Akteure, die sich jedoch ihrer Funktion als Impulsgeber nicht bewusst sind. Des Weiteren identifizieren die Forschungsvorhaben rechtliche Hürden, die im jeweiligen Forschungskontext ein Hemmnis bei der Umsetzung der Energiewende darstellen.

Abbildung 1

oben:
Themenverteilung in den Vorhaben

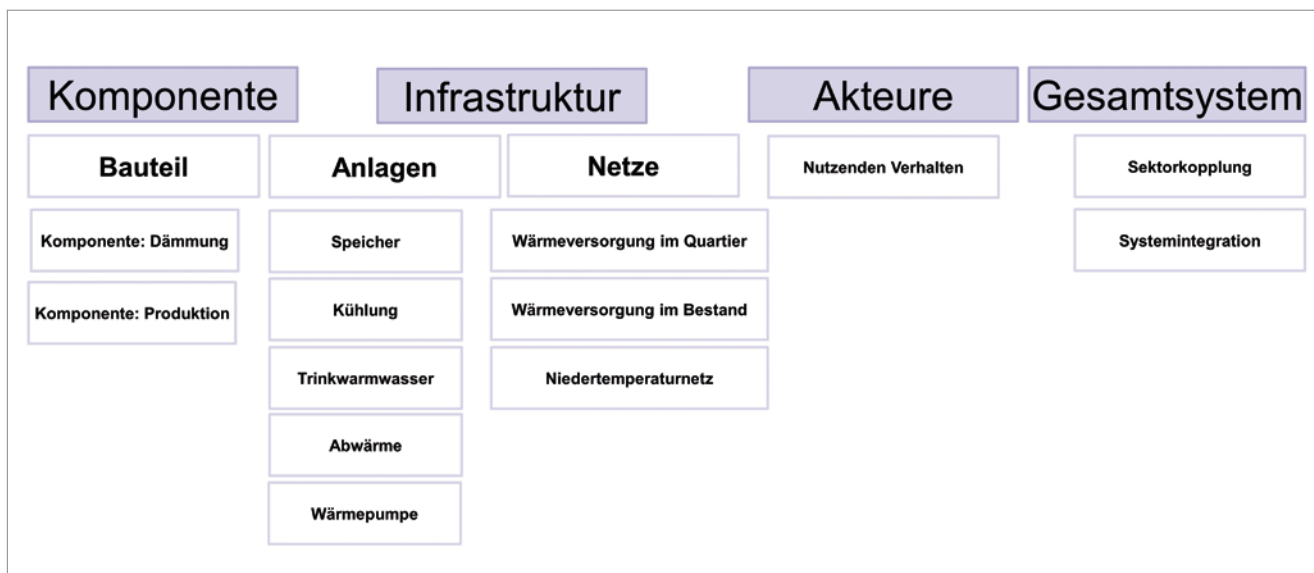
unten:
beispielhafte Auswahl der Themenverteilung

(Quelle: IZES)

Abbildung 2

Clusterung der Wärmewende-Forschung

(Quelle: IZES)



hat seitdem zugenommen. Dieser Zusammenhang lässt sich durch die zunehmende Komplexität und den Herausforderungen in der Forschungsinitiative Energiewendebauen begründen, zu deren umfassenden Bearbeitung spezialisierte Konsortialpartner*innen gemeinsam forschen.

Der Blick auf das Netzwerk der FVEE-Mitglieder innerhalb der Forschungsinitiative zeigt die Vernetzung zwischen den FVEE-Mitgliedern sowie mit den direkten Konsortialpartner*innen. Die Abbildung verdeutlicht die zentrale Rolle der FVEE-Mitglieder, die häufig die Funktion der Konsortialleitung innehaben, innerhalb dieses Netzwerks. Gleichzeitig wird aber auch sichtbar, dass die FVEE-Mitglieder untereinander im Bereich Energiewendebauen nur im Einzelfall direkt kooperieren. Ein direktes Zusammenarbeiten in den derzeit bewilligten Forschungsvorhaben ist selten, was mit der thematischen Breite begründet werden kann. Daraus ergibt sich ein Potenzial zur stärkeren Zusammenarbeit.

Die Auswertung der thematischen Ausrichtung und die Kooperationstätigkeit der FVEE-Mitgliedsinstitutionen weisen auf vielfältige Möglichkeiten des Zusammenarbeitens hin. Die Optionen von Projektkooperation in zukünftigen Forschungsvorhaben sollte näher betrachtet werden, da die Forschungsthemen der einzelnen Institute äußerst spezialisiert vorliegen und die Komplexität der Energiewende sehr ausgeprägt ist. Dies unterstreicht die Bedeutung von Austauschmöglichkeiten im Rahmen von Projektleitertreffen, Tagungen, Netzwerktreffen und Ähnlichem, die von der Wissenschaftlichen Begleitforschung aktiv angeboten werden.

Zusammenfassung und Ausblick

Die FVEE-Institute sind im Bereich der Wärmewendeforschung aktiv und tragen dazu bei, technologische Entwicklungen in diesem Bereich anzustoßen und deren Integration in bestehende Systeme zu verstehen und voranzubringen. Neben der Beforschung von neuen Technologien werden auch bestehende Systeme, Nutzende und umsetzungsrelevante Aspekte beforscht.

Durch die Spezialisierung der einzelnen Forschungspartner in den Vorhaben entsteht ein Potenzial, sich auch unter den FVEE-Instituten verstärkt zu vernetzen und die Synergien besser zu nutzen. Dieser Prozess soll durch die Wissenschaftliche Begleitforschung Energiewendebauen durch entsprechenden Austauschformate unterstützt werden.

Fußnoten

- 1 Die Förderung der Projekte der Forschungsinitiative Energiewendebauen durch das Ministerium für Wirtschaft und Klimaschutz erfolgt aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages. Die gilt auch für den hier vorliegenden Beitrag.
- 2 Es wurden alle laufenden Teilvorhaben von FVEE-Mitgliedern befragt, die zum 01.04.2022 in EnArgus, dem Internet-Portal des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz rund um das Thema Energieforschung, als Forschungsvorhaben der Forschungsinitiative Energiewendebauen registriert waren. Die Rücklaufquote der Befragung beträgt 76%. Dies entspricht einer Datengrundlage von 47 Teilvorhaben.
- 3 In diesem Bereich der Auswertung ist aufgrund eines Zuordnungsfehlers auf EnArgus das Vorhaben ENable des Fraunhofer IBP versehentlich in die Auswertung mit eingerechnet worden.

Beitragende aus den FVEE-Mitgliedseinrichtungen

CAE

- Michael Brütting
michael.brueetting@cae-zerocarbon.de
- Dr. Bastian Büttner
bastian.buettner@cae-zerocarbon.de
- Felix Klinker
felix.klinker@cae-zerocarbon.de
- Andreas Stephan
andreas.stephan@cae-zerocarbon.de

DLR

- Dr. Peter Klement
peter.klement@dlr.de
- Dirk Krüger
dirk.krueger@dlr.de
- Thomas Poppinga
thomas.poppinga@dlr.de

FZ Jülich

- Dr. Dmitry Sergeev
d.sergeev@fz-juelich.de
- Dr. André Xhonneux
a.xhonneux@fz-juelich.de

GFZ

- Fabian Möller
fabian.moeller@gfz-potsdam.de

IBP

- Jan Kaiser
jan.kaiser@ibp.fraunhofer.de

IEE

- Christopher Graf
christopher.graf@iee.fraunhofer.de
- Dr. Anna Marie Cadenbach
anna.cadenbach@iee.fraunhofer.de
- Dr. Michael Krause
michael.krause@iee.fraunhofer.de
- Dennis Lottis
dennis.lottis@iee.fraunhofer.de
- Dr. Dietrich Schmidt
dietrich.schmidt@iee.fraunhofer.de
- Dr. Sebastian Wende-von-Berg
sebastian.wende-von.berg@iee.fraunhofer.de

ISE

- Dr. Bruno Bueno
bruno.bueno@ise.fraunhofer.de
- Sven Fahr
sven.fahr@ise.fraunhofer.de
- Dr. Sophie Gledhill
sophie.gledhill@ise.fraunhofer.de

- Sebastian Helmling
sebastian.helmling@ise.fraunhofer.de
- Dr. Michael Hermann
michael.hermann@ise.fraunhofer.de
- Dr. Wolfgang Kramer
wolfgang.kramer@ise.fraunhofer.de
- Dr. Manuel Lämmle
manuel.laemmle@ise.fraunhofer.de
- Axel Oliva
axel.oliva@ise.fraunhofer.de
- Nicolas Réhault
nicolas.rehault@ise.fraunhofer.de

ISFH

- Dr. Federico Giovannetti
f.giovannetti@isfh.de
- Carsten Lampe
c.lampe@isfh.de
- Dr. Bianca Lim
b.lim@isfh.de
- Peter Pärtsch
p.paerisch@isfh.de
- Robert Puknat
r.puknat@isfh.de
- Bert Schiebler
schiebler@isfh.de

IZES

- Dr. Katharina Gapp-Schmeling
gapp-schmeling@izes.de
- Juri Horst
horst@izes.de
- Patrick Marx
marx@izes.de
- Karsten Rauber
rauber@izes.de

KIT

- Dr. Kevin Förderer
kevin.foerderer@kit.edu
- Prof. Dr. Veit Hagenmeyer
veit.hagenmeyer@kit.edu
- Prof. Dr. Thomas Lützkendorf
thomas.luetzkendorf@kit.edu
- Romina Paula Risetto
romina.risetto@kit.edu
- Prof. Andreas Wagner
wagner@kit.edu
- Prof. Dr. Rosemarie Wagner
rosemarie.wagner@kit.edu

ZAE

- Dr. Manuel Riepl
manuel.riepl@zae-bayern.de
- Lars Staudacher
lars.staudacher@zae-bayern.de

Klimaneutrale Wärmeversorgung – Bedeutung für die Energiewende und Herausforderungen bei Technik, Wirtschaftlichkeit und Regulierungen

Ca. 50 % des Endenergiebedarfes in Deutschland, wie auch im Mittel in Europa, sind Wärme. Die Energiewende kann also nur mit einer Wärmewende gelingen. Eine klimaneutrale Wärmeversorgung zeitnah zu erreichen muss daher wesentliches Ziel der Gesellschaft und der Politik der kommenden Jahre sein. Dies spiegelt sich auch in den Sektorenzielen der Bundesregierung wider: sowohl im Gebäudesektor als auch im Industriesektor werden deutliche Einsparungen der CO₂-Emissionen erwartet, die wesentlich auf eine Umstellung der Wärmebereitstellung abzielen.

In Jahr 2022 kamen zu dieser bereits bekannten Zielsetzung aus klimapolitischer Sicht durch den Krieg in der Ukraine weitere wesentliche Aspekte hinzu: In der öffentlichen Diskussion dominierte das Thema „Versorgungssicherheit“ in der Wärmeversorgung von Gebäuden und Industrie. Gleichzeitig wurde Erdgas als billige und ausreichend zur Verfügung stehende „Brückentechnologie“ in Frage gestellt und die hohen fossilen Energiepreise rückten einige bisher oft als zu aufwändig betrachtete nachhaltige Technologien schlagartig mehr ins Zentrum der Lösungen.

Somit war 2022 das Jahr, in dem das Thema klimaneutrale Wärme bisher unbekanntes Aufmerksamkeit erfuhr.

Im Klimaschutzgesetz (KSG) sind in den drei für die Wärme relevanten Sektoren bis 2030 Minderungen der Treibhausgasemissionen um 42 % (Gebäude), 43 % (Industrie) und 56 % (Energiewirtschaft) als Ziel festgelegt (► *Abbildung 1*).

Aufgrund des auf dem Quellprinzip basierenden Bilanzierungsansatzes des KSG ist dabei zu beachten, dass z.B. Emissionen aus Strom für den Betrieb von Wärmepumpen ebenso wie aus der Wärmebereitstellung für die Fernwärme in der Energiewirtschaft bilanziert werden und die Gesamtemissionen infolge des Betriebes und der Errichtung von Gebäuden fast 40 % ausmachen.

Auswirkungen der Energiekrise auf die Transformationspfade: Der energiesystemanalytische Blick

In verschiedenen Instituten der beteiligten Autor*innen werden techno-ökonomische Analysen des Energiesystems der Zukunft durchgeführt und verschiedene Szenarien betrachtet. Bei allen Unsicherheiten der Entwicklung der ökonomischen Randbedingungen stellen sich dabei sehr robuste und bei breiter Varianz der Annahmen übergeordnete Trends in der Entwicklung der Wärmeversorgung heraus:

- Der übergeordnete Trend ist die direkte Elektrifizierung der Wärme, je nach Temperaturniveau entweder über Wärmepumpen-Prozesse oder in der Industrie auch durch Stromdirektheizung. Für die Bereitstellung des benötigten grünen Stromes ist ein Ausbau der erneuerbaren Stromerzeuger (allen voran Wind und PV) sowie der zur Verteilung notwendigen Netzinfrastruktur, unabdingbar – und in den benötigten Größenordnungen auch möglich. Dieser Ausbau muss als Grundlage für alles Weitere stringent vorangetrieben werden.
- Die indirekte Elektrifizierung der Wärmeversorgung durch elektrolytisch erzeugte stoffliche Energieträger wie Wasserstoff wird im Bereich hoher Temperaturen in der Industriewärme und in der Fernwärme in der Kraftwärmekopplung eine Rolle spielen, der Umfang ist aufgrund noch nicht sicherer Zeitschiene und Verfügbarkeiten noch mit Unsicherheiten versehen.
- Weitere Wärmeversorgungstechnologien werden zwingend benötigt werden. So kommt neben der Solarthermie vor allem in den kommenden Jahren der Biomassennutzung eine wichtige Rolle im kurzfristigen Ersetzen des ausfallenden russischen Gases zu, zumal die Biomasse bzw. Biogas damit die wichtige Flexibilisierung unterstützen kann. Aber auch die Geothermie wird einen Teil der Wärmeversorgung sinnvollerweise übernehmen, gerade die tiefe Geothermie besticht durch die mögliche Grundlastfähigkeit.



Fraunhofer ISE

*Dr. Peter Schossig
schossig@ise.fraunhofer.de*

*Dr. Christoph Kost
christoph.kost@ise.fraunhofer.de*

*Sebastian Herkel
sebastian.herkel@ise.fraunhofer.de*

DBFZ

*Dr. Nora Szarka
nora.szarka@dbfz.de*

DLR

*Dr. Thomas Pregger
thomas.pregger@dlr.de*

*Dr. Hans Christian Gils
hans-christian.gils@dlr.de*

ISFH

*Dr. Raphael Niepelt
niepelt@isfh.de*

KIT

*Prof. Dr. Veit Hagenmeyer
veit.hagenmeyer@kit.edu*

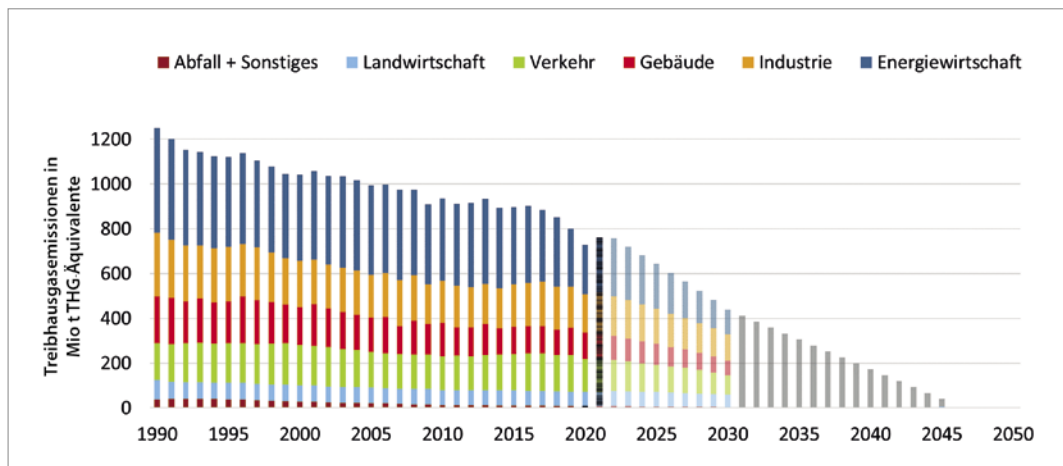
Wuppertal Institut

*Christine Krüger
christine.krueger@wupperinst.org*

ZSW

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

Abbildung 1
CO₂-Emissionen nach Klimaschutzgesetz (KSG), Werte ab 2020 Zielwerte
 (Quelle: Fraunhofer ISE)



In ► **Abbildung 2** werden beispielhaft mögliche Entwicklungen einmal aus dem elektrischen Teil des Energiesystems dargestellt und einmal mit Fokus auf mögliche kostenoptimale Entwicklungen der Wärmeversorgung.

► **Abbildung 2** zeigt das Szenario „Energiesouveränität“. Der Strombedarf steigt bis 2045 um fast das 2 ½ fache, wobei über 90% aus Wind und PV stammen. Die Stromnutzung steigt in allen Anwendungsfeldern, neu hinzu kommen die Elektrifizierung im Verkehr, die die Wasserstoff-Elektrolyse und Methanisierung sowie der Stromeinsatz im Wärmebereich in Gebäuden und der Industrie.

Ein spezifischer Blick in den Gebäudesektor zeigt genau diese Elektrifizierung über Wärmepumpen. In ► **Abbildung 3** sind die Anzahl der Heizungsanschlüsse nach Technologie aufgezeigt. Kontinuierlich von heute bis 2045 ist ein Austausch vieler Gas- und Ölkessel zur Dekarbonisierung des Gebäudesektors notwendig. Ein überwiegender Teil der Anschlüsse und fast vollständig die Heizungsanschlüsse in Ein- und Zweifamilienhäusern wird über Wärmepumpen ersetzt. Die Anzahl von Fernwärmeanschlüssen steigt in verdichteten Gebieten außerdem deutlich an.

Auswirkungen der Elektrifizierung des Wärmesektors auf das Stromsystem: Sektorenkopplung und Flexibilisierung

Die Elektrifizierung der Wärmezeugung führt zu einer sehr engen Kopplung der Sektoren und hat unterschiedliche Auswirkungen auf die notwendige Infrastruktur und deren Betrieb.

Einerseits ist insbesondere der Heizwärmebedarf stark saisonal ausgeprägt und antizyklisch zur PV-Stromerzeugung. Außerdem erfolgt die Stromnachfrage zum Teil zu ungünstigen Schwachlastzeiten.

Andererseits kann die Wärmeversorgung, wenn sie sinnvoll in das Energiesystem integriert wird, vor allem aufgrund der kostengünstigen Speicherfähigkeit von Wärme und der Trägheit der Wärmespeicherung in der Gebäudehülle auch zur Entlastung der Stromnetze genutzt werden. Dadurch kann sie helfen, die Kosten des Gesamtsystems zu reduzieren, indem Stromspeicher eingespart werden und auch der Netzausbau in Teilen reduziert werden kann.

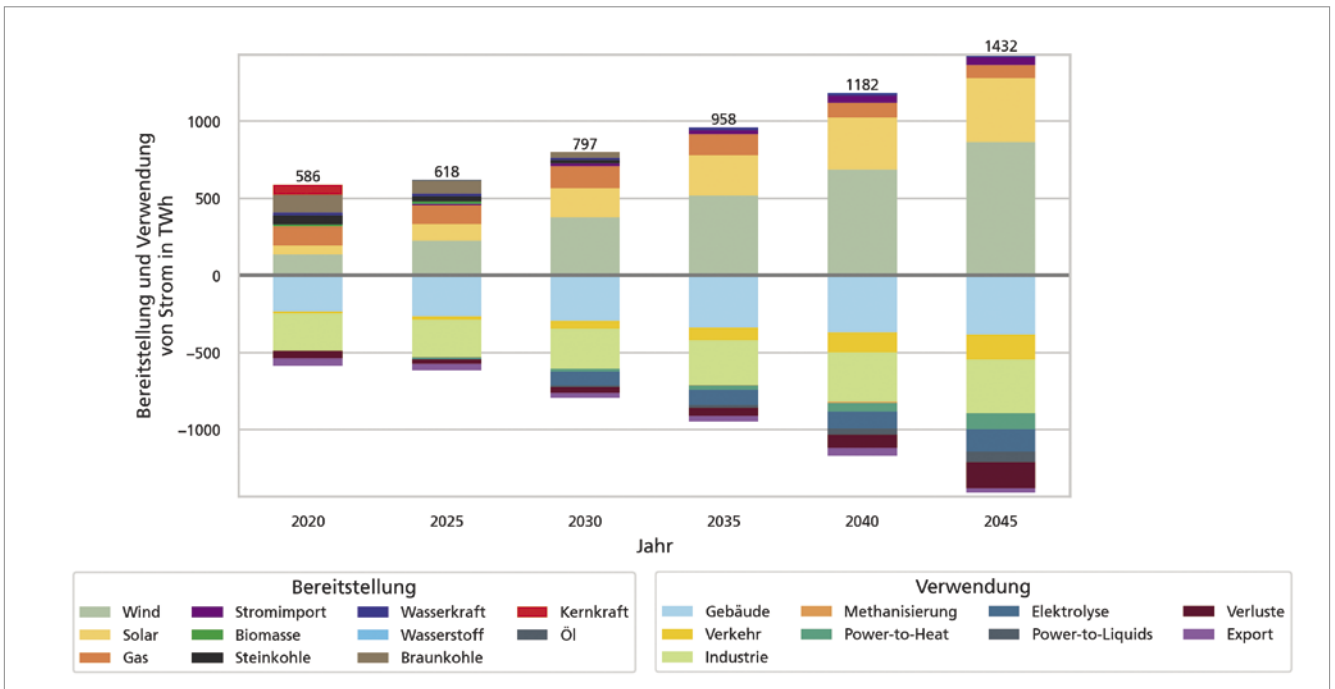
Eine Analyse des Effekts von thermischen Speichern auf die Abregelung erneuerbaren Stroms und auf den notwendigen Ausbau der eingesetzten Reservekraftwerke für unterschiedliche Szenarien zeigt ► **Abbildung 4**.

Es werden die folgenden drei Szenarien jeweils einmal mit und einmal ohne thermische Energiespeicher (TES) dargestellt:

- Base (Referenz-)Szenario mit > 60% fluktuierendem PV- und Windstrom in Europa, eingeschränkter Flexibilität (ohne Ausbau Netze, Speicher, Importe) und nur direkter Elektrifizierung im Verkehr
- H2T: wie Base, aber mit flexibilisierter Wasserstoffherzeugung für den Verkehr und zusätzlicher Stromerzeugung
- Grid: wie Base, aber mit Option Netzausbau

Dabei sind folgende Ergebnisse abzuleiten:

- Die Modellierung zukünftiger Stromsysteme einschließlich Sektorenkopplung (Deutschland im europäischen Verbund) zeigt die systemischen Effekte der flexibilisierten Wärmeversorgung
- Durch Wärmespeicherzubaue erfolgt eine Minderung der Abregelung von PV und Wind um ca. 35% bis 40% in den drei gezeigten Szenarien.
- Die Minderung der benötigten Backup-Kraftwerksleistung durch den Einsatz thermischer Speicher kann ca. 10% bis 15% betragen.



- Es sind höhere Werte erwartbar bei umfangreicherem PV- und Wind-Onshore-Ausbau. Die absoluten Beiträge sind dabei auch abhängig von der Verfügbarkeit anderer Flexibilitäts-Optionen im System und der Wärmeversorgungsstruktur.

Lösungen

Anwendungsbeispiel: Integriertes Konzept für die lokale Wärmewende mit geothermischer Wärmeerzeugung und Aquiferspeicherung

Auch am KIT Campus Nord, dem Forschungscampus im Hardtwald nördlich von Karlsruhe, steht die Frage nach der zukünftigen, klimaneutralen Versorgung mit Energie und insbesondere Wärme im Fokus. Wärme wird auf dem Campus heute mittels Blockheizkraftwerken und Heizkessel auf dem Gelände erzeugt und per Wärmenetz auf dem Campus verteilt (► *Abbildung 5*).

Abbildung 2
Szenario „Energiesouveränität“
Bereitstellung und Verwendung von Strom
(Quelle: Fraunhofer ISE, basierend auf Ariadne Projekt, Deutschland auf dem Weg aus der Gaskrise – Wie sich Klimaschutz und Energiesouveränität vereinen lassen 2022)

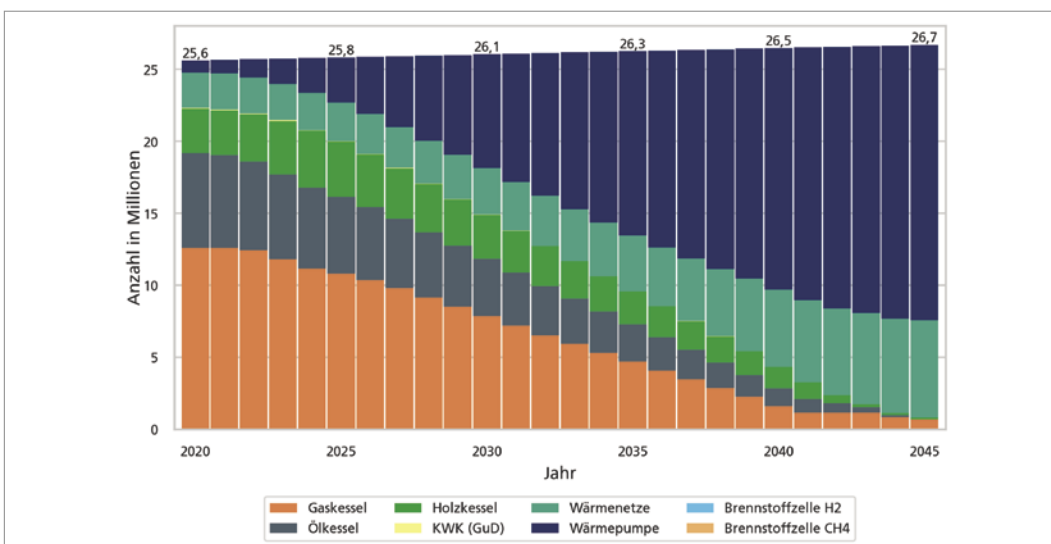


Abbildung 3
Szenario „Energiesouveränität“ des Gesamtsystems Deutschland
modelliert mit REMod. Dargestellt wird die mögliche Entwicklung des Anteils der Wärmeerzeuger in Gebäuden.
(Quelle: Fraunhofer ISE, basierend auf Ariadne Projekt, Deutschland auf dem Weg aus der Gaskrise – Wie sich Klimaschutz und Energiesouveränität vereinen lassen 2022)

Abbildung 4

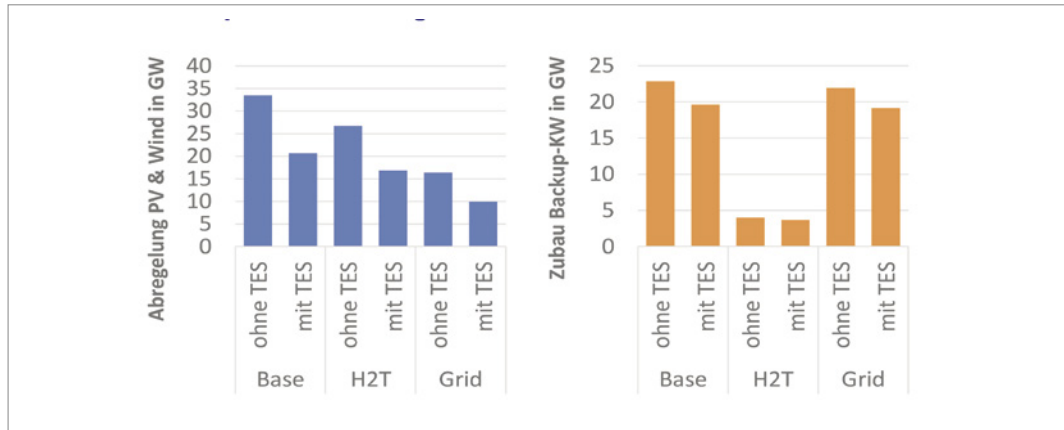
Effekt von thermischen Speichern (THS)

im deutschen Stromsystem für die Szenarien Base, H2T und Grid:

links: Abregelung von PV- und Windstromerzeugern

rechts: Zubaubedarf von Back-up-Kraftwerksleistung

(Quelle: basierend auf Gils 2015, Modell REMix)



Mit der Lage im oberen Rheingraben ergeben sich beste Voraussetzungen für den Einsatz von Geothermie. Im Rahmen zweier Studien (Zwickel et al. 2022 und Herrmann 2022) wurde untersucht, wie sich deren Nutzung auf die Wärmeversorgung und insgesamt auf die Klimabilanz auswirkt. Dabei wurde auch der mögliche Einsatz eines Aquiferspeichers evaluiert, der Wärmeüberschüsse über die Zeit mit geringem Wärmebedarf speichern und später bei Bedarf wieder abgeben kann. Es handelt sich folglich um einen saisonalen Speicher. Wärmeüberschüsse sind dabei dadurch bedingt, dass die Geothermie möglichst gleichmäßig über das gesamte Jahr genutzt werden soll, um das Risiko induzierter seismischer Ereignisse gering zu halten. Der Wärmebedarf für das Jahr 2018 ist exemplarisch in ► **Abbildung 6** dargestellt. Er beläuft sich in Summe auf etwa 40 GWh. Der Bedarf ist über die kalten Monate (Oktober bis April) am

ausgeprägtesten und erreicht seinen Höchststand im Frühjahr. Er wird vollständig durch die Blockheizkraftwerke und Heizkessel gedeckt.

► **Abbildung 7** zeigt wie der identische Wärmebedarf mit geothermischer Wärmeerzeugung und einem Aquiferspeicher gedeckt werden kann. Es wird mit einer geothermischen Wärmeerzeugung von 9MW gerechnet. Diese ist in der Lage abseits der Heizperiode die volle thermische Grundlast zu decken. In den Monaten mit besonders hoher Nachfrage kann der Aquiferspeicher zusätzliche 3MW bereitstellen. Das Resultat ist eine Senkung der CO₂-Emissionen um über 50% durch die geothermische Wärmeerzeugung und weitere 7% durch den Aquiferspeicher.

Mit dem Blick auf das Jahr 2030 kann die geothermische Wärmeerzeugung (in Kombination mit weiterem, ambitioniertem Zubau erneuerbarer Energien in Form von Photovoltaik und Windkraft) einen großen Beitrag dazu leisten die Treibhausgasemissionen des Forschungscampus um etwa 81% im Vergleich zum Jahr 2019 zu reduzieren (Herrmann 2022). Darüber hinaus wird die Abhängigkeit von Gas stark reduziert. Ein interessantes Zusammenspiel von Gas und Strom ergibt sich mit Blick auf die Wirtschaftlichkeit. Diese ist stark durch das Verhältnis von Strompreis zu Gaspreis geprägt, da die eingesetzten Blockheizkraftwerke neben Wärme auch Strom erzeugen. Durch die Substitution der Wärmeerzeugung aus den Blockheizkraftwerken mit der geothermischen Erzeugung muss mehr Strom aus dem öffentlichen Stromnetz bezogen werden. Hohe Strompreise in Kombination mit geringen Gaspreisen würden dafür sorgen, dass die bisherige Energieversorgung ökonomisch besser ist (Herrmann 2022). Das Resultat wären dann allerdings neben einer Abhängigkeit von Gas auch deutlich höhere Treibhausgasemissionen. Wie sich Strom- und Gaspreise im Verhältnis zueinander entwickeln werden ist ungewiss.

Abbildung 5

Wärmekonzept für den Campus Nord des KIT:

- Blockheizkraftwerke (CHP = combined heat and power plant und GEL = Gasmotoren-Erprobungslabor)
- Boiler = Heizkessel
- grün = unterirdischer Speicherknoten
- schwarz = Versorgungsknoten

(Quelle: Philipp Zwickel, KIT)



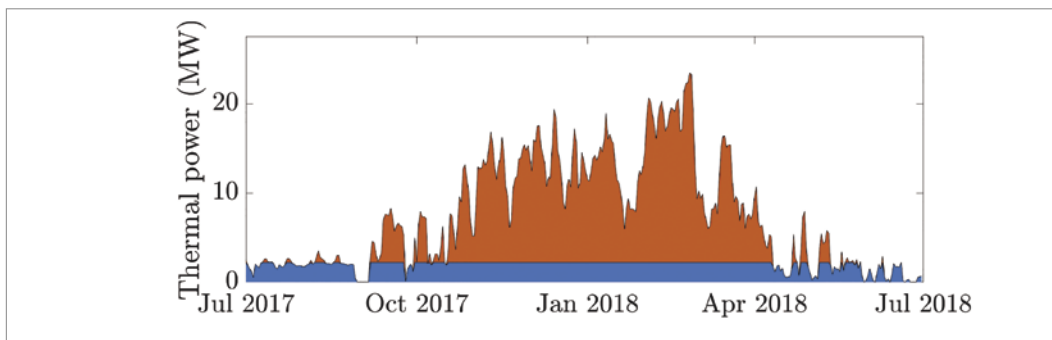


Abbildung 6

Wärmebedarf des Campus Nord des KIT vor der Umstellung:

Simulation der jahreszeitlichen Entwicklung der thermischen Leistung durch KWK und Heizkessel

(Quelle: nach Zwickel et al. 2022)

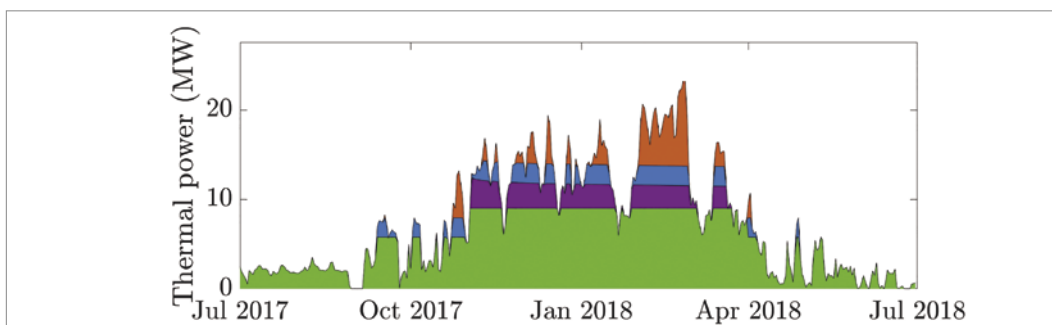


Abbildung 7

Wärmebedarf des Campus Nord des KIT nach der Umstellung:

Simulation der jahreszeitlichen Entwicklung der thermischen Leistung durch KWK, Heizkessel, Erdwärmanlage und HT-ATES (Hochtemperatur-Aquifer-Wärmespeicher)

(Quelle: nach Zwickel et al. 2022)

Zusammenfassung

Als wesentlicher Trend in der Wärmeversorgung lässt sich identifizieren, dass die Elektrifizierung der Wärmeversorgung der Gebäude im Schwerpunkt durch Wärmepumpen erfolgen wird.

Ebenso muss Fernwärme zunehmen, wobei auch hier immer mehr Wärmepumpen im Netz die Wärme bereitstellen werden. Geothermie kann ebenfalls einen großen Beitrag zur Reduktion der Treibhausgasemissionen in mit Fernwärme versorgten Gebieten leisten.

In der Industrie kommen neben den stofflichen Energieträgern und den direktelektrischen Systemen langfristig auch Hochtemperaturwärmepumpen zum Einsatz.

Die Nutzung der Biomasse kann als schnell verfügbarer Ersatz für fehlendes Erdgas fungieren, wobei das Potenzial limitiert ist und eine zunehmende Flächenkonkurrenz zum Ausbau der Photovoltaik auf Freiflächen besteht.

Die Wärme liefert Flexibilitätspotenziale, um fluktuierenden Solar- und Windstrom effizienter zu nutzen und verringert den Bedarf für elektrische Zwischenspeicher und liefert so einen Beitrag zur Verminderung der notwendigen Investitionen in die Infrastruktur des Energiesystems.

Aktuelle Hindernisse bei der Umsetzung der Wärmewende bestehen in der Knappheit personeller Ressourcen im Handwerk infolge höheren technischen Aufwandes für die Umrüstung der Wärmeversorgung und hoher Investitionen mit langen Amortisationszeiten.

Gezielte Forschung und Entwicklung kann einen wichtigen Beitrag leisten um die Kosten zu senken, die Effizienz der Anlagen zu erhöhen, die Planung, Inbetriebnahme und das Monitoring der Anlagen zu vereinfachen und dadurch den Umstieg zu beschleunigen.

Quellen

- Gils, Hans Christian (2015) Balancing of Intermittent Renewable Power Generation by Demand Response and Thermal Energy Storage. Dissertation, Universität Stuttgart. <http://dx.doi.org/10.18419/opus-6888>
- Zwickel, P. Bauer, F. Schätzler, K. Steiner, U. Waczowicz, S. Hagenmeyer, V. Schill, E. (2022): Integrated Concept of local heat transition using geothermal heat production, aquifer storage and optimal scheduling of distribution network, European, Geothermal Congress (EGC) 2022, Berlin, 2022
- Herrmann, J. (2022): CO₂-Neutralität am KIT Campus Nord: Potenziale erneuerbarer Energien und ihr Einfluss auf die Eigenversorgung und die Wirtschaftlichkeit, Masterarbeit 2022 KIT

Gesellschaftliche Akzeptanz der Wärmewende

Aktuelle Forschung, Fallbeispiele und sozialverträgliche Lösungsansätze



UFZ
Dr. Matthias Jordan
matthias.jordan@ufz.de

Es besteht Einvernehmen, dass die hohe Komplexität des Wärmesystems das zentrale Hindernis für die Wärmewende darstellt: Der Wärmebedarf im Industrie- und Gebäudesektor ist durch unterschiedliche Temperatur- und Nachfrageprofile aber auch durch verschiedene Geschäftsmodelle gekennzeichnet. Im Gebäudebereich sind darüber hinaus auch die vielfältigen Erwartungen und Präferenzen der Millionen von Investoren und Nutzern entscheidend, die über rein techno-ökonomische Überlegungen hinausgehen. Diese Systemkomplexität erschwert die Entwicklung von Strategien im Wärmesektor und hemmt unter anderem auch die Möglichkeiten für Technologieentwickler das Marktpotenzial ihrer Innovationen einzuschätzen.



Prof. Dr. Daniela Thran
daniela.thran@ufz.de

Fragen der Akzeptanz müssen folglich auf mehreren Ebenen Berücksichtigung finden, von Fragestellungen der Gesamtsystemanalyse bis hin zu einzelnen Umsetzungsprojekten. Entsprechend vielfältig ist die Forschung zur gesellschaftlichen Akzeptanz der Wärmewende im FVEE. Sie umfasst sowohl die Analyse von Nutzerpräferenzen bis hin zur gemeinsamen Gestaltung von Energiewendeprojekten, um die Gelingensbedingungen zu verbessern.

Prof. Dr. Matthias Groß
matthias.gross@ufz.de

Allen Ansätzen ist gemein, dass die vorherrschende technisch-ökonomische Betrachtung der Wärmewende erweitert wird: Es wird nach Faktoren geforscht, welche die Nutzer*innen beeinflussen und es werden gezielt Bereiche untersucht, welche das Potenzial für zukünftige Akzeptanzkonflikte haben. Des Weiteren gibt es Ansätze, die Akzeptanzfragen bereits im Entwicklungsprozess von Innovationen zu berücksichtigen. Abschließend, in Bezug auf die konkrete Umsetzung von Wärmetransformationsprojekten, werden verschiedene Methoden des Co-Designs entwickelt, erforscht und getestet. Im Folgenden werden einzelne Projekte aus den verschiedenen Bereichen vorgestellt.

Dr. Frank Huesker
frank.huesker@ufz.de

DBFZ
Dr. Konrad Siegfried
konrad.siegfried@dbfz.de

KIT
Dr. Christine Roesch
christine.roesch@kit.edu

Prof. Dr. Eva Schill
schill@geo.tu-darmstadt.de

Wuppertal Institut
Dr. Benjamin Best
benjamin.best@wupperinst.org

ZSW
Patrick Wolf
patrick.wolf@zsw-bw.de

Modell BenOpt-Heat

Energiesystemmodelle werden häufig verwendet, um die Politik über Strategien für die Energiewende zu informieren. Allerdings werden die Heterogenität der Verbraucher*innen und ein von der wirtschaftlichen Rationalität abweichendes Verbrauchsver-

halten in den Modellen nur selten berücksichtigt. Gerade im Wärmesektor, der nicht nur aus technischer Sicht durch seine Heterogenität gekennzeichnet ist, gibt es verschiedene Akteure mit unterschiedlichen Interessen und Investitionspräferenzen. Mittels des am UFZ entwickelten Modells BenOpt-Heat (Jordan et al. 2022) wurden optimale Wärmetransformationsszenarien berechnet und analysiert, welche die Nutzerpräferenzen in Bezug auf die Heizungswahl berücksichtigen (Jordan et al. 2021). Das Ziel dieser Studie ist, Politikempfehlungen in Bezug auf die zukünftige optimale Nutzung des limitierten Bioenergie-Potenzials mit einem höheren Maß an Belastbarkeit liefern zu können.

Zunächst wurden im Rahmen einer Literaturrecherche umfragebasierte empirische Daten zu den Investitionspräferenzen der Verbraucher*innen für Heizungsanlagen in Deutschland ermittelt (Michelsen und Madlener 2013). Die in der Studie durchgeführte Clusteranalyse ergab eine Segmentierung der Nutzer in verschiedene Verbrauchergruppen („Der Komfort-orientierte Nutzer“, „Der Konsequenzen bewusste Nutzer“ und „der vielseitig orientierte Nutzer“). Diese Daten wurden in das Modell integriert, wobei Methoden der Nutzersegmentierung verwendet und mit einem neuartigen Ansatz zur Berechnung der indirekten Kosten kombiniert wurden. Die indirekten Kosten stellen dabei die nicht-ökonomischen Präferenzen dar.

Es wurden zwei Szenarien analysiert: Ein Business-as-usual- und ein ambitioniertes Maßnahmenzenario. Die Ergebnisse zeigen, dass die Integration der Heterogenität von Verbraucher*innen und der Investitionspräferenzen zu einer höheren Diversität der Technologie-Marktanteile im Sektor der privaten Haushalte führt (► *Abbildung 1*). Dies deutet darauf hin, dass die Nachfrage nach Bioenergie im Sektor der Privathaushalte in den untersuchten Szenarien Beharrungsvermögen zeigt und dass die Holzliche Biomasse nicht nur für (Hochtemperatur-)Industrieanwendungen in Betracht gezogen werden sollte, wie dies bisher empfohlen wurde (Jordan et al. 2020). Bei der Betrachtung der Ergebnisse muss jedoch berücksichtigt werden, dass sich Präferenzen ändern können und die empirische Datenbasis begrenzt ist.

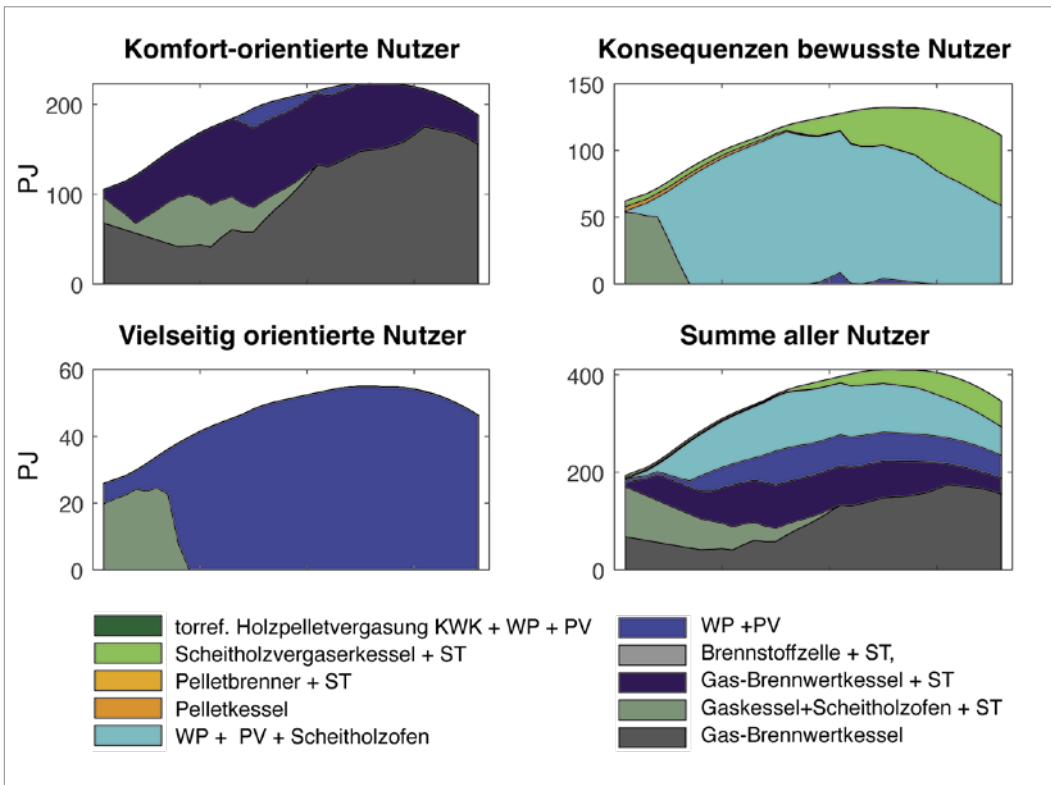


Abbildung 1

Beispielhafte Modellierungsergebnisse in einem (7,5 kW thermische Leistung) der 19 Wärme-Sub-Sektoren

im Sektor Private Haushalte für verschiedene Nutzergruppen.

KWK = Kraftwärmekopplung
 WP = Wärmepumpe
 PV = Photovoltaik
 ST = Solarthermie

(Quelle: Jordan et al. 2021)

Entwicklung der Wohnfläche

Neben der Präferenz für bestimmte Heizsysteme spielen auch die Ansprüche an die Wohnfläche in Deutschland eine entscheidende Rolle in der Wärmewende. Die Pro-Kopf-Wohnfläche ist in den letzten Jahrzehnten kontinuierlich angestiegen. Ein weiterer Anstieg der Wohnfläche impliziert eine Zunahme des Flächen-, Ressourcen- und Energieverbrauches. Daher ist es eine Schlüsselaufgabe, diesen Zuwachs

zu begrenzen bzw. umzukehren (Kobiela et al. 2020) (► *Abbildung 2*). Dies hat unmittelbare Auswirkungen auf die Wärmewende. Um den Wohnflächenbedarf umzukehren, werden kurzfristig Anreize für die dauerhafte Untervermietung eines Raumes oder Teil des Hauses (nicht an Touristen), mittelfristig die Möglichkeit zum Wohnungstausch in eine für beide Parteien (flächenmäßig) bedarfsgerechte Wohnung und langfristig Monitoring und Nutzung von Leerstand und Aufstockungspotenzialen statt immer

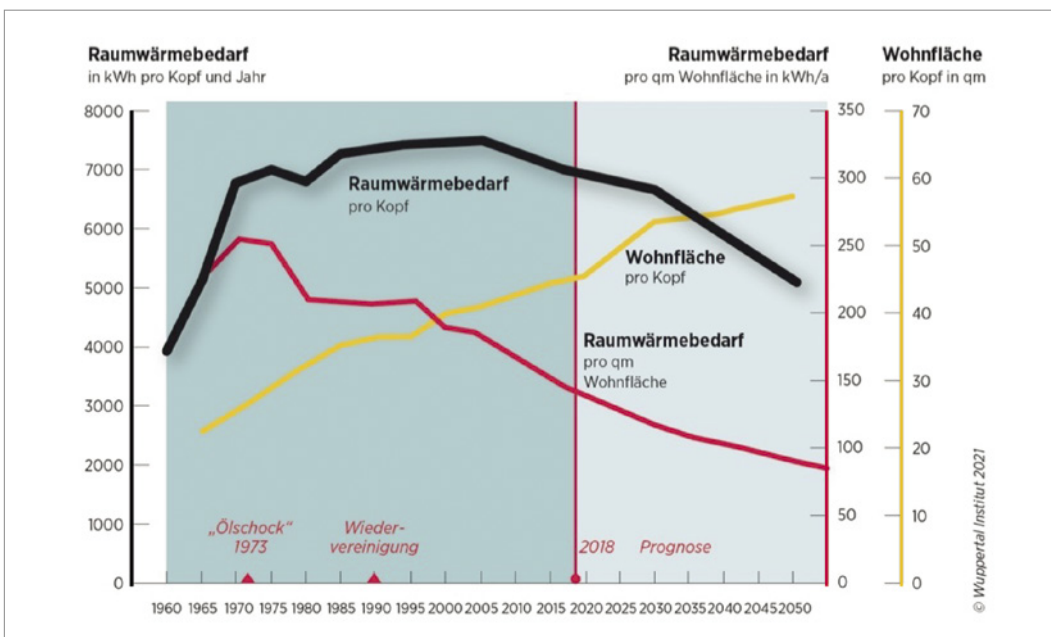


Abbildung 2

Entwicklung von Wohnfläche und Raumwärmebedarf in Deutschland:

Zielkonflikt zwischen Wohnflächen-Wachstum und Energieeffizienz

(Quelle: Wuppertal Institut, 2021)

mehr Wohnungsneubau gesehen (vgl. Politik-Datenbank von Zell-Ziegler et al. 2022). Suffizienz umfasst neben der effizienten Nutzung des Wohnraums auch Suffizienz im Neubau (bedarfsgerechte Planung), der bedarfsgerechte Heizenergie- und Warmwasserverbrauch sowie Umbau und Nachverdichtung im Gebäudebestand.

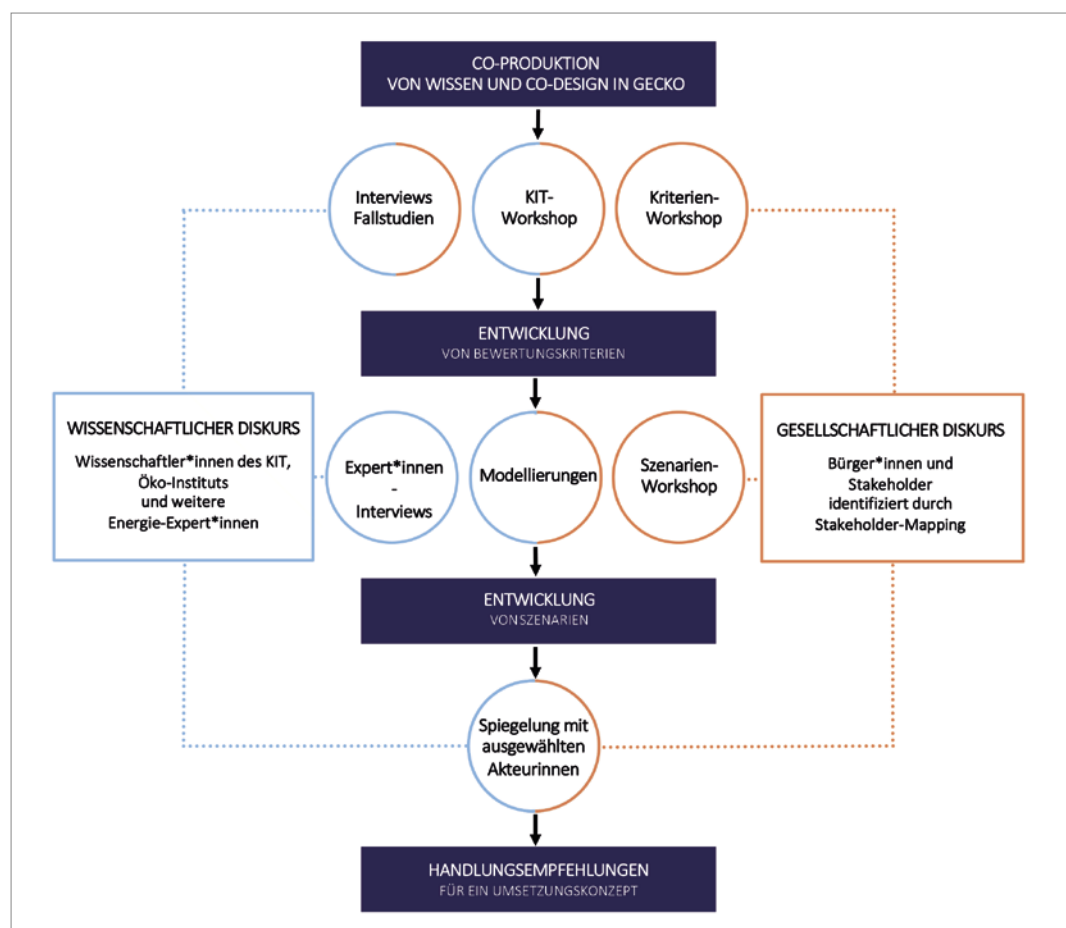
Eine Umfrage des Wuppertal Instituts aus dem Jahr 2021 zeigt auf: Suffizienzmaßnahmen haben ein hohes soziales Potenzial: 31 % der Befragten können sich vorstellen, in eine kleinere Wohnung umzuziehen. 26 % können sich vorstellen, ihr Haus umzubauen, um den Einzug weiterer Personen zu ermöglichen. 51 % können sich gemeinschaftliches Wohnen vorstellen (Wuppertal Institut 2021). Wir müssen uns bewusst sein, dass diverse Barrieren diesen Wünschen im Wege stehen – diese können aber politisch adressiert werden (Fischer et al. 2020).

In einer aktuellen Szenario-Studie für die EU berechnet Zimmermann: mit Suffizienz im Gebäudebereich können zusätzlich 16% der THG-Emissionen eingespart werden. Und die Reduktion der Pro-Kopf-Wohnfläche bis 2050 ist zugleich die effektivste Suffizienzmaßnahme zur Senkung des Ressourcen-

und Energiebedarfes (Zimmermann 2022). Eine durchdachte Suffizienzpolitik sollte daher Bestandteil der Transformation hin zu einem klimaneutralen Gebäudebestand sein.

In den bisher genannten Beispielen werden vor allem die Präferenzen der Endnutzer in den privaten Haushalten berücksichtigt. Die Industrie hat jedoch einen ähnlichen hohen Beitrag zur Wärmewende zu leisten und auch hier spielt Akzeptanz eine Rolle. Diese ist durch das Makro-Umfeld bestimmt, in dem politische, ökonomische, soziale, technische, ökologische, rechtliche (legale) und infrastrukturelle Faktoren wirken, die durch die PESTEL+I Methode analysiert werden kann (Blümel et al. 2022; Angwin et al. 2007; Johnson et al. 2016; Siegfried et al. 2022; Yüksel 2012) und dabei unterschiedlichste Akteure berücksichtigt. Erfasst wird, ob die Faktoren einen positiven, negativen oder neutralen Einfluss auf die Wertschöpfungskette haben und daher als Hindernis oder Chance für ein Geschäftsmodell bzw. eine Wertschöpfung kategorisiert werden können. Auf Basis der Einordnung und Kategorisierung können Strategien und Empfehlungen relativ einfach herausgearbeitet werden.

Abbildung 1
Geothermienutzung für klimaneutrale Wärmeversorgung am KIT Campus Nord
 Inter- und transdisziplinäres Co-Design eines Umsetzungskonzepts
 (Quelle: ITAS, 2020)



Projekt MUSIC

In einem Fallbeispiel wurde im Rahmen eines durch das EU-Programm „Horizon 2020“ geförderten Projektes ‚MUSIC - Unterstützung der Markteinführung von intermediären Bioenergieträgern‘ die Herstellung von torrefizierter Biomasse (Biokohle) aus Holzabfällen (Altholz Typ B) und Hybridabfällen (Reststoffe mit Abfallbiomasse und Kunststoffen) für Hochtemperaturprozesse untersucht.

Bei der Analyse der Wertschöpfungskette wurden einige hindernde Faktoren beschrieben, wie z. B. die unterschiedliche Deklaration von Altholzabfällen in der EU, regional nicht ausreichende Abfallrohstoffmengen, die Einschränkung der Bioenergienutzung in der EU sowie die wachsende Nachfrage konkurrierender Industrien. Chancen für das Konzept ergeben sich durch die große Nachfrage nach Net-Zero-Stahl, dem Trend zur Nutzung lokal verfügbarer Abfallrohstoffe (Verringerung von Importen) und aus den momentan hohen Preisen für fossile Kohle.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Debatte um die Nachhaltigkeit der Bioenergie die Industrie hemmt, zu investieren. Interessengruppen (Land- und Waldbesitzer) und die Industrie (Abfallwirtschaft, Stahlhersteller) sollten Verbände bilden, um die Nutzung von Reststoffen und die intersektorale Kommunikation zu fördern und die Akzeptanz in der Bevölkerung zu verbessern. Die langfristige Gültigkeit von Vorschriften und politischen Rahmenbedingungen für mindestens 5–15 Jahre würde Investitionssicherheit für langfristige Geschäftsmodelle bieten und das schnelle Upscaling von Anlagen und Produktionsprozessen ermöglichen.

Das MUSIC-Projekt ist nur ein Beispiel für Akzeptanzkonflikte in der Industrie. Folglich stellt sich die Frage wie man verschiedene nicht-ökonomische Einflussfaktoren bereits im Aufbau- bzw. Entwicklungsprozess von Industrien oder Technologien integrieren kann.

Projekt V4InnovatE

Einen weiteren Lösungsansatz liefert das Forschungsprojekt V4InnovatE, welches sich mit der Frage der Akzeptanz von technischen Innovationen beschäftigt, die für eine erfolgreiche Umsetzung der Energie- und Wärmewende essenziell sind. Der zentrale Gedanke des Projekts ist, dass durch eine frühzeitige Ausrichtung von Forschungs-, Technologieentwicklungs- und Innovationsprozessen (FTI-Prozessen) an den gesellschaftlichen Bedürfnissen und Werten die Wahrscheinlichkeit erhöht werden kann, dass neue Technologien und Innovationen von der Bevölkerung akzeptiert werden.

V4InnovatE baut hierfür auf dem Konzept der Verantwortungsvollen Forschung und Innovation (Responsible Research and Innovation; RRI) auf, das sich mit der Frage einer ökologisch und sozial verantwortlichen Gestaltung und Steuerung von Forschungs- und Innovationsprozessen beschäftigt und in den letzten zehn Jahren vor allem in der europäischen Forschungslandschaft zunehmend an Bedeutung gewonnen hat (Schlaile et al. 2018; Stilgoe et al. 2013; Schomberg 2013).

In dem Forschungsprojekt wird auf Basis dieses Konzepts ein Indikatorensystem entwickelt, das forschenden Organisationen (öffentlich, privat) ein Instrument an die Hand gibt, mit dem FTI-Prozesse auf die Berücksichtigung gesellschaftlicher Bedürfnisse und Werte hin überprüft und gestaltet werden können. Die Entwicklung wird u.a. durch Fallstudien, Simulationen sowie Expertenworkshops unterstützt. Ein Leitfaden soll schließlich Struktur und Anwendung des Indikatorensystems veranschaulichen und die Rolle herausstellen, die RRI und hierauf aufbauend eine antizipierende, reflexive, inklusive, responsive sowie transparente Ausgestaltung von FTI-Prozessen in der Energie- und Wärmewende spielen kann.

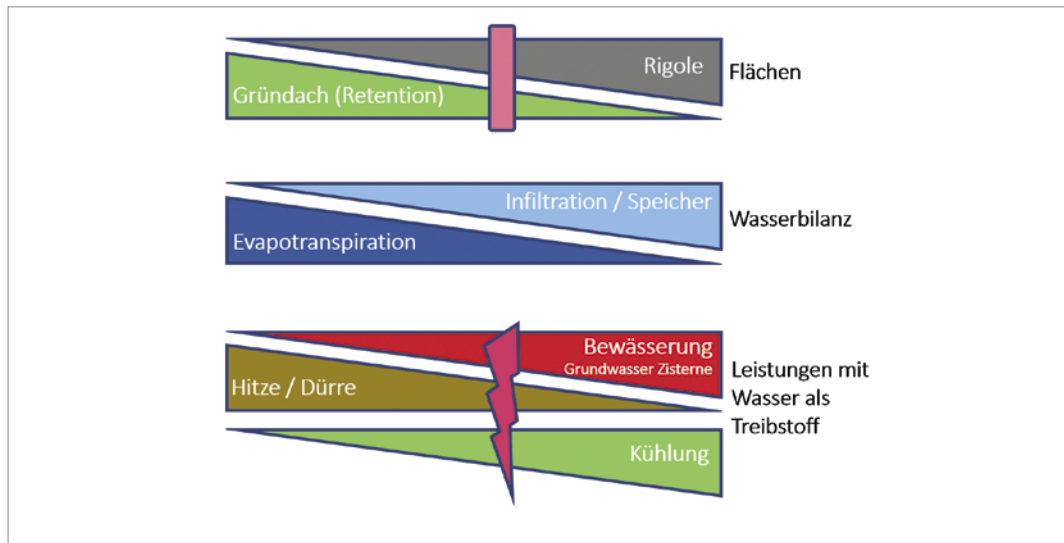
Projekt GECKO

Schlussendlich bestehen bessere Gelingensbedingungen wenn konkrete Umsetzungsprojekte realisiert werden, die gleichzeitig die Interessenvertreter*innen und Anwohner*innen in den Planungsprozess integrieren und deren Perspektiven frühzeitig berücksichtigen, um mögliche Konflikte zu vermeiden, die ein Vorhaben verzögern oder gar verhindern können. Im inter- und transdisziplinären Projekt GECKO wurden die Gelingensbedingungen für eine Nutzung der Tiefengeothermie zur dezentralen Wärme- und Stromversorgung in Kommunen erforscht, die das Kriterium der Akzeptanz erfüllen und sich am Gemeinwohl orientieren. In einem mehrstufigen partizipativen Format (► *Abbildung 3*) wurden Kriterien zur Entwicklung und Bewertung von Szenarien mit verschiedenen kommunalen Teilhabe-Möglichkeiten an der Nutzung von Tiefengeothermie erarbeitet. Das Ergebnis dieses Diskurses wurde mit den an der Umsetzung beteiligten Akteuren diskutiert.

Basierend auf den Ergebnissen des GECKO-Prozesses wurden vier zentrale Handlungsempfehlungen für die erfolgreiche Umsetzung des Co-Design-Ansatzes identifiziert:

- 1) Erarbeitung einer gemeinsamen Vision der Energie- und Wärmewende durch Projektierer, Stakeholder und Bürger*innen und der Rolle der

Abbildung 4
Abwägungen bei der blaugrünen Quartiersentwicklung
 „Blaugrüne Infrastruktur“ bezeichnet ein Netz naturnaher Flächen mit Bepflanzung und Wasser.
 (Grafik: UFZ, 2022)



- Tiefengeothermie in der zukünftigen Wärme- und Stromversorgung, bspw. durch das Co-Design von Szenarien
- 2) Realisierung einer transparenten proaktiven Kommunikation und dialogischer Formate sowie eines offenen Zugangs zu Informationen und Daten für Stakeholder und Bürger*innen
 - 3) Etablierung unabhängiger wissenschaftlicher Beratung und Moderation, die von allen Prozessbeteiligten (v. a. Projektierer, Stakeholder und Bürger*innen) akzeptiert werden
 - 4) Ermöglichung einer planerischen Teilhabe und eines erkennbaren ökonomischen sowie ideellen Nutzen durch die Wärmenutzung auf lokaler Ebene

Blaugrüne Infrastrukturen

Ein weiteres Beispiel für ein partizipatives Umsetzungsprojekt ist die Errichtung eines Neubauviertels in Leipzig, in welchem Blaugrüne Infrastrukturen (BGI) erheblich zum Bereich Kühlung im Rahmen der Wärmewende beitragen kann. Blaugrüne Infrastrukturen bestehen aus mehreren kleinteiligen Elementen wie Gründächern, Grünfassaden, Baumrigolen, Zisternen oder Mulden, die in ihrer Summe und Kombination volle Wirkung erzeugen (► *Abbildung 4*). Sowohl die blauen wie die grünen Elemente tragen zur Wärmewende bei, insbesondere über die Kühlungseffekte im Sommer, die im BMBF-Vorhaben Leipziger BlauGrün auch systematisch untersucht werden. Die Wasserkörper könnten in Zukunft ggf. auch als Wärmespeicher verwendet werden. Nennenswerte Effekte blaugrüner Infrastrukturen für die Wärmewende ergeben sich, wenn diese dezentrale Infrastrukturtransformation flächendeckend implementiert wird.

Schlüsselfaktoren für die gesellschaftliche Akzeptanz liegen nach Einschätzung der Forschenden vor allem im Bereich der Politikergebnisse. Dabei wird in aller erster Linie das Phänomen der „Grünen Gentrifizierung“ als Risiko gesehen: blaugrüne Infrastrukturen – wie auch andere aus ökologischen Gründen implementierte dezentrale Infrastrukturen – dürfen hinsichtlich gesellschaftlicher Akzeptanz nicht zu Wohnkosten führen, die breitere Bevölkerungsgruppen ausschließen. Da die Stadt durch blaugrüne Infrastrukturen Wasser zurückhält, das sie bislang abgeleitet hat, sind zudem Auswirkungen auf das Umland zu eruieren und transparent zu diskutieren. Partizipative Politikelemente können insbesondere in Phasen des Betriebs und der Pflege der blaugrünen Infrastrukturen zur Geltung kommen. Politisch-rechtliche Rahmenbedingungen sollten folglich so ausgestaltet werden, dass sie blaugrüne Infrastrukturen nicht nur erlauben, sondern auch explizit bezwecken, um Akzeptanz insbesondere bei den nicht-progressiven Entscheidungsträgern vor Ort zu schaffen.

Weitere Akzeptanzkonflikte

Akzeptanzkonflikte können nicht nur bei der Errichtung erneuerbarer Lösungen auftreten, sondern auch erst im späteren Betrieb entstehen. Im Bereich der flachen Geothermie, welche langfristig den Löwenanteil der Wärmetransformation ausmachen soll, lässt sich bei Zunahme der Anzahl von Geothermieanlagen in Wohngebieten eine Verringerung, gelegentlich sogar ein temporäres Versiegen thermaler Wärmequellen beobachten. Dies führt bei Nachbarschaftsverhältnissen vereinzelt zu Konflikten, kann aber mittelfristig zu weiterreichenden Akzeptanzproblemen führen, da diese Konflikte auch medial aufgearbeitet werden. Es wird daher untersucht, wie

Hausbesitzer*innen mit den damit verbundenen Unsicherheiten und Wissenslücken umgehen (Bleicher und Gross 2016), aber auch, ob sich hierdurch Eigentumsvorstellungen durch die Veränderung der Naturressourcen infolge ihrer energetischen Nutzung verändern können (Horn et al. 2022). Fokus wird auf die Grenzen der Erneuerbarkeit der Naturressourcen gelegt, da die Gründe für Temperaturschwankungen (natürliche Schwankungen, technische Probleme im oder am Haus, ein besonders heizintensiver kalter Winter oder nachbarschaftliche Konkurrenzen etc.) meist nicht eindeutig zugeschrieben werden können. Der strategische Umgang mit unvermeidbarem Nichtwissen (Groß und McGoey 2022) ist hier ein zentraler Faktor zum besseren Verständnis von Akzeptanz oder Nicht-Akzeptanz.

Fazit

Zusammenfassend kann geschlussfolgert werden, dass Akzeptanzthemen die Wärmewende bereits umfänglich auf verschiedensten Ebenen beeinflussen. Anhand der unterschiedlichen Forschungsvorhaben können Effekte für die Heizungsauswahl, die Brennstoffauswahl aber auch Suffizienzbeiträge gezeigt werden. Es ist wichtig die Einflussfaktoren zur Akzeptanz zu identifizieren und frühzeitig im Entwicklungsprozess von Innovationen zu berücksichtigen. Bei konkreten Umsetzungsprojekten fördert das Co-Design generell das Gelingen und wirkt Akzeptanzkonflikten entgegen. Der FVEE forscht auf verschiedensten Ebenen zur Akzeptanz im Rahmen der Wärmewende, ein kontinuierliches und koordiniertes Monitoring dieser Aktivitäten findet jedoch noch nicht statt und wäre für die Zukunft wünschenswert.

Literaturverzeichnis

- Angwin, Duncan; Cummings, Stephen; Smith, Chris (2007): *The strategy pathfinder. Core concepts and micro-cases*. Malden, Mass.: Blackwell.
- Bleicher, Alena; Gross, Matthias (2016): Geothermal heat pumps and the vagaries of subterranean geology: Energy independence at a household level as a real world experiment. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 64, S. 279–288. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.06.013>
- Blümel, L.; Siegfried, K.; Riedel, F.; Thrän D. (2022): Are strategy developers well equipped when designing sustainable supply chains for a circular bio-economy? Supporting innovations' market uptake in a PESTEL+I environment. In: *Energy, Sustainability and Society* (under review).
- Fischer, C.; Cludius, J.; Förster, H.; Fries, T.; Steiner, V.; Brischke, L.-A. et al. (2020): Möglichkeiten der Instrumentierung von Energieverbrauchsreduktion durch Verhaltensänderung. Hg. v. Umweltbundesamt (UBA). Online verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/instrumentierung-energieverbrauchsreduktion>.
- Groß, Matthias; McGoey, Linsey (Hg.) (2022): *Routledge international handbook of ignorance studies*. Second edition. London, New York, NY: Routledge (Routledge international handbooks). Online verfügbar unter <https://www.taylorfrancis.com/books/9781003100607>.
- Horn, Daniel; Gross, Matthias; Pfeiffer, Maria; Sonnberger, Marco (2022): How Far Is Far Enough? The Social Constitution of Geothermal Energy through Spacing Regulations. In: *Sustainability* 14 (1), S. 496. <https://doi.org/10.3390/su14010496>.
- Johnson, Gerry; Whittington, Richard; Scholes, Kevan; Angwin, Duncan; Regné, Patrick (2016): *Strategisches Management. Eine Einführung*. 10., aktualisierte Auflage. Hallbergmoos, Germany: Pearson (Always learning).
- Jordan, Matthias; Hopfe, Charlotte; Millinger, Markus; Rode, Julian; Thrän, Daniela (2021): Incorporating consumer choice into an optimization model for the German heat sector: Effects on projected bioenergy use. In: *Journal of Cleaner Production* 295 (5), S. 126319. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126319>

- Jordan, Matthias; Millinger, Markus; Thrän, Daniela (2020): Robust bioenergy technologies for the German heat transition: A novel approach combining optimization modeling with Sobol' sensitivity analysis. In: *Applied Energy* 262, S. 114534.
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114534>
- Jordan, Matthias; Millinger, Markus; Thrän, Daniela (2022): Benopt-Heat: An economic optimization model to identify robust bioenergy technologies for the German heat transition. In: *Chem. Eng. Technol.* 18 (5), S. 101032.
<https://doi.org/10.1016/j.softx.2022.101032>.
- Kobiela, G.; Samadi, S.; Kurwan, J.; Tönjes, A.; Fishedick, M.; Koska, T. et al. (2020): CO₂-neutral bis 2035: Eckpunkte eines deutschen Beitrags zur Einhaltung der 1,5-°C-Grenze [Projektbericht]. Hg. v. GLS Bank & Fridays for Future Deutschland. Online verfügbar unter <https://epub.wupperinst.org/frontdoor/index/index/docId/7606>.
- Michelsen, Carl Christian; Madlener, Reinhard (2013): Motivational factors influencing the homeowners' decisions between residential heating systems: An empirical analysis for Germany. In: *Energy Policy* 57, S. 221–233.
<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.01.045>
- Schlaile, Michael P.; Mueller, Matthias; Schramm, Michael; Pyka, Andreas (2018): Evolutionary Economics, Responsible Innovation and Demand: Making a Case for the Role of Consumers. In: *Philosophy of Management* 17 (1), S. 7–39. DOI: 10.1007/s40926-017-0054-1.
<https://link.springer.com/article/10.1007/s40926-017-0054-1>
- Schomberg, René von (2013): A Vision of Responsible Research and Innovation. In: Richard Owen, John R. Bessant und Maggy Heintz (Hg.): *Responsible innovation. Managing the responsible emergence of science and innovation in society*. Chichester, West Sussex, United Kingdom: Wiley, S. 51–74.
- Siegfried, K.; Blümel, L.; Riedel, F.; Moosmann, D.; Cyffka, K-F; Richters, M. et al. (2022): Plating the hot potato - how to make intermediate bioenergy carriers an accelerator to a climate neutral Europe. In: *Energy, Sustainability and Society* (under review).
- Stilgoe, Jack; Owen, Richard; Macnaghten, Phil (2013): Developing a framework for responsible innovation. In: *Research Policy* 42 (9), S. 1568–1580.
<https://doi.org/10.1016/j.respol.2013.05.008>
- Wuppertal Institut (Hg.) (2021): Wohnsituation & Wohnqualität. Ergebnisse einer Online-Umfrage im Rahmen des Projekts „OptiWohn“. Online verfügbar unter https://www.wohnen-optimieren.de/app/download/13277633231/OptiWohn_Auswertung+Online-Survey.pdf?t=1638352343.
- Yüksel, Ihsan (2012): Developing a Multi-Criteria Decision Making Model for PESTEL Analysis. In: *IJBM* 7 (24).
<https://doi.org/10.5539/ijbm.v7n24p52>
- Zell-Ziegler, C.; Best, B.; Thema, J.; Wiese, F.; Vogel, B.; Cordroch, L. (2022): European Sufficiency Policy Database. Data set. Hg. v. Energy Sufficiency Research Group. Online verfügbar unter <https://energysufficiency.de/policy-database/>.
- Zimmermann, Patrick (2022): Transformationspfade für den europäischen Gebäudesektor: Vergleich von Umwelteinsparungen durch Suffizienz-, Konsistenz- und Effizienzmaßnahmen. In: *TATuP* 31 (2), S. 32–39.
<https://doi.org/10.14512/tatup.31.2.32>

Lösungsansätze für die schnelle Umstellung von 20 Mio. Einzelgebäudeheizungen von fossil auf erneuerbar

Einführung

Der Anteil erneuerbarer Energien bei der Wärme- (und Kälte-)versorgung lag 2021 in Deutschland bei 16,5% (knapp 200 TWh/a). Davon stammten 86% aus Biomasse und davon wiederum 47% allein aus Holzfeuerungen im häuslichen Bereich. Der Rest der erneuerbaren Wärme stammte aus oberflächennaher Geothermie und Umgebungswärme (Wärmepumpen) mit 9% und Solarthermie mit 4,2%. Bisher vergleichsweise kleine Beiträge stammten aus der tiefen Geothermie [1]. Im Jahr 2021 waren bezogen auf die rund 21 Millionen im Bestand befindlichen Einzelgebäudeheizanlagen (nicht Einzelraumfeuerstätten) 1,1 Mio. Wärmepumpen und 0,9 Mio. Biomassekessel im Betrieb. Hinzu kommen zusätzliche 2,5 Mio. solarthermische Anlagen mit einer Gesamtkollektorfläche von rund 21 Mio. m² [2]. Bei den neu installierten Wärmeerzeugern konnten Wärmepumpen und Biomassekessel auch 2021 einen deutlich steigenden Absatz verzeichnen, wobei ihr Anteil an den insgesamt rund 930.000 neu installierten Wärmeerzeugern bei knapp 25% lag [3].

Doch 2021 nutzten immer noch rund 19 Mio. Wärmeerzeuger Gas und Öl [2]. Darüber hinaus müssen in Wohngebäuden auch noch Etagenheizungen und veraltete Biomasseheizsysteme ausgetauscht werden. Für eine erfolgreiche Wärmewende bis 2045 im Gebäudewärmebereich müssen also weiterhin jedes Jahr rund eine Million neue komplett Erneuerbare-Heizanlagen installiert und in Betrieb genommen werden. Nach dem Anschluss an zumindest perspektivisch vollständig erneuerbar versorgte Wärmenetze sind für alle anderen Objekte Wärmepumpen, Wärmepumpen-Biomasse-Hybride und, nur wo es keine anderen Möglichkeiten gibt, reine Biomassekessel zu installieren. Alle Lösungen lassen sich zusätzlich mit Solarthermieanlagen ergänzen. Im Vergleich zu Erdgasthermen ist jedoch allein die Installation der deutlich komplexeren Systeme mit mindestens dem doppelten Zeitaufwand zu veranschlagen, während die Branche bereits heute über einen realen Fachkräftemangel klagt. Es braucht also wirksame Lösungsansätze der Forschung zur Überwindung dieser und vieler anderer Hemmnisse zur erfolgreichen Wärmewende bis 2045.

Notwendige Impulse für die erfolgreiche Wärmewende

Um einen angemessenen Beitrag zu einer Begrenzung des weltweiten Temperaturanstiegs auf 1,5 Grad Celsius zu leisten, müsste Deutschland und damit auch der Gebäudesektor schon bis 2035 treibhausgasneutral sein. Im Auftrag von Greenpeace hat daher das Wuppertal Institut ein auf dieses Ziel ausgerichtetes Sechs-Punkte-Sofortprogramm für erneuerbare Wärme und effiziente Gebäude erarbeitet. Dieses sieht vor, dass in drei zentralen Bereichen jeweils eine ordnungsrechtliche Maßnahme mit einer spezifischen, dazu passenden finanziellen Fördermaßnahme kombiniert wird (► *Abbildung 1*):

- Ausstiegsgesetz für fossile Heizungen und Förderung für elektrische Wärmepumpen und Solarthermie
- Pflicht und Förderung für die energetische Sanierung ineffizienter Gebäude mit ökologischen Kriterien
- Gesetz mit Zielen sowie förderlichen Bestimmungen und dazu passende Förderung für Erneuerbare-Wärmenetze: Ausbau und Umstieg auf grüne Wärmeerzeugung

So würde das Sofortprogramm die energetische Sanierungsrate auf drei bis vier Prozent pro Jahr erhöhen und dazu führen, dass schon 2035 fast zwei Drittel der Gebäude mit Wärmepumpen und etwa ein Viertel mit Nah- und Fernwärme aus erneuerbaren Energien beheizt werden und ein Drittel zusätzlich mit thermischen Solaranlagen ausgestattet wird. Die Studie hat gezeigt: Die beschleunigte Wärmewende ist für die Haushalte, Unternehmen und öffentlichen Einrichtungen wirtschaftlich. Im Jahr 2035 sparen sie netto rund 11,5 Milliarden Euro ein. Zudem können rund 500.000 Arbeitsplätze für Fachkräfte gesichert oder neu geschaffen werden, davon etwa 260.000 in der Bauwirtschaft. Nach den Berechnungen für die Studie sind für die Umsetzung bis 2035 durchschnittlich pro Jahr rund 50 Milliarden Euro zusätzliche Investitionen und gut 20 Milliarden Euro staatliche Fördermittel erforderlich [4].



DBFZ

Dr. Volker Lenz
volker.lenz@dbfz.de

Prof. Dr. Ingo Hartmann
ingo.hartmann@dbfz.de

ISFH

Daniel Eggert
d.eggert@isfh.de

Fraunhofer ISE

Dr. Constanze Bongs

Jan Mattmüller

jan.mattmueller@ise.fraunhofer.de

Wuppertal Institut

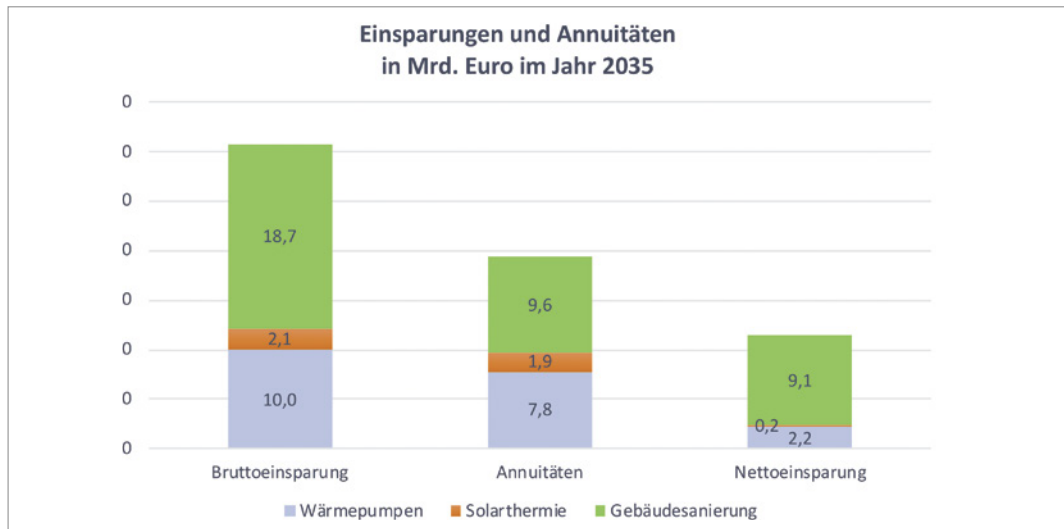
Dr. Stefan Thomas
stefan.thomas@wupperinst.org

Abbildung 1

Wirtschaftlichkeit des 6-Punkte-Sofortprogramms für die Verbraucher*innen [4]:

- Energiekosteneinsparungen (Bruttoeinsparung, links)
- Annuitäten der zusätzlichen Investitionen abzgl. Förderung (Mitte)
- resultierende Nettoeinsparungen (Bruttoeinsparung minus Annuitäten, rechts)

(Quelle: Wuppertal-Institut, [4])



Hemmnisse und digitale Lösungsansätze

Im Projekt OBEN – Ölersatz Biomasse Heizungen gefördert vom BMWK (03KB156) hat das DBFZ eine umfangreiche Hemmnisanalyse im Hinblick auf die Umsetzung der Wärmewende im Gebäudeheizbereich am Beispiel der Umstellung auf Biomassekessel durchgeführt und mit verschiedenen Akteursgruppen abgestimmt (► *Abbildung 2*).

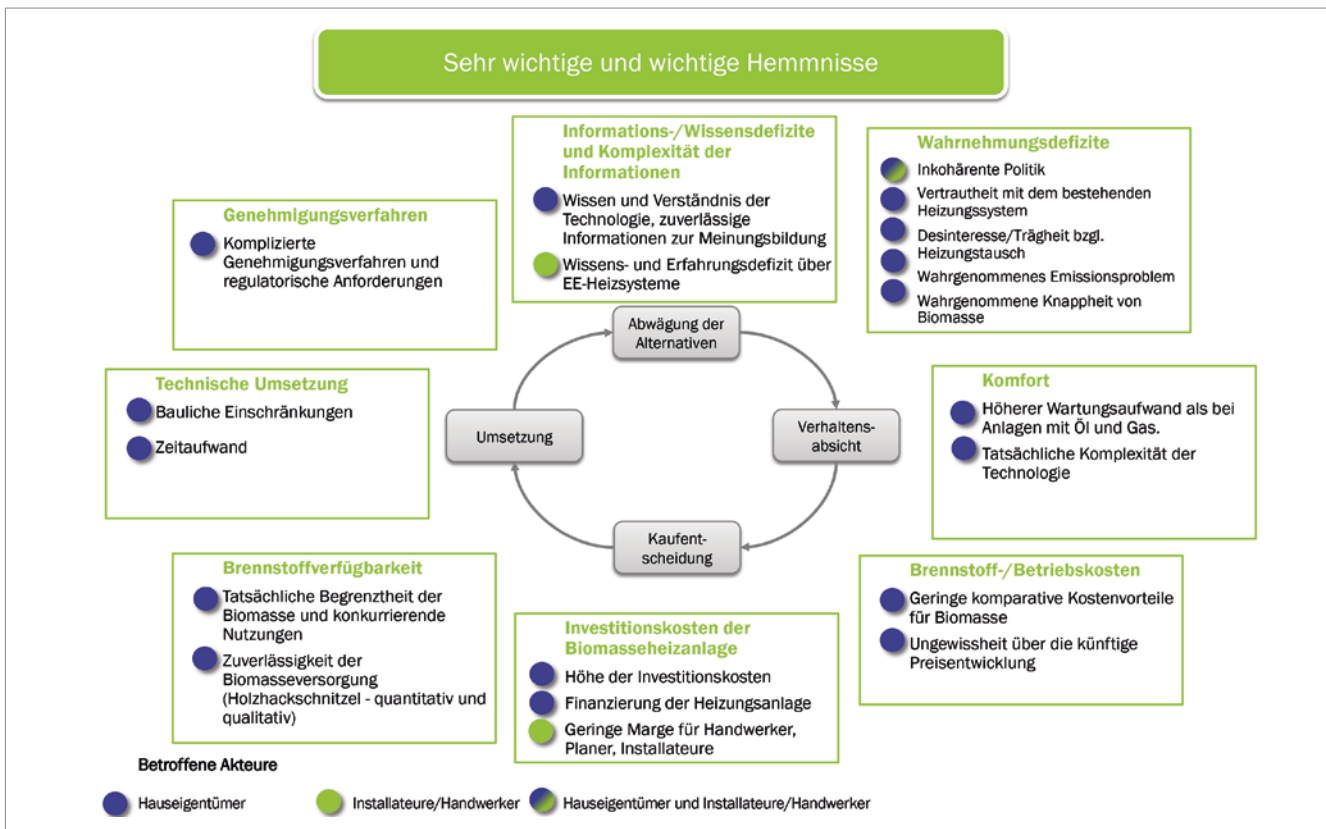
Dabei konnten fünf wesentliche Aspekte identifiziert werden: Im Grunde gibt es genügend Informationen zu erneuerbaren Wärmelösungen, jedoch besteht ein

Defizit in der Bereitstellung der passenden Informationen zur passenden Zeit mit der passenden Detailtiefe. Bevor die Informationssuche beginnen kann, gilt es ein Wahrnehmungsdefizit zu überwinden. Viele Bürger*innen haben zu allen erneuerbaren Wärmelösungen negative Aussagen gehört, so dass sie bezweifeln, dass es für ihre ganz persönliche Umstellung von Öl oder Gas auf erneuerbare Alternativen eine zufriedenstellende Lösung gibt. Sollten beide Hemmnisse überwunden werden, beginnt das Abwägen der Kosten und die Frage nach der Finanzierung. Hier kann es schnell zu einer realen

Abbildung 2

Hemmnisanalyse zur Umstellung von Gebäudeheizanlagen auf erneuerbare Energien am Beispiel Pelletfeuerungen

(Quelle: DBFZ, [5])



oder gefühlten Überforderung kommen. Sollte auch dieses Hemmnis gelöst werden, bleibt die Suche nach einem geeigneten Handwerksbetrieb, der die Installation in absehbarer Zeit umsetzen kann. Speziell für Biomassefeuerungen bleibt dann aber auch noch die Frage nach der Verfügbarkeit und Nachhaltigkeit der Brennstoffe. Dies wird durch die aktuelle Pelletspreisentwicklung unterstrichen [5].

Während die letzte Fragestellung durch hybride Lösungen aus Wärmepumpe und Biomasse entspannt werden kann, benötigen alle anderen Hemmnisse Zeit von Fachkräften für die Informationsaufbereitung – und -vermittlung, die Beratung, Planung, Bau und Inbetriebnahme von Anlagen und die Betriebsoptimierung. Aber menschliche Arbeitskraft wird nicht im benötigten Umfang zur Verfügung stehen, daher muss die Digitalisierung in allen Gebieten mit Nachdruck vorangetrieben werden. Am DBFZ wird als einer der nötigen Bausteine ein digitales Erstberatungstool erstellt, das mittels einer geführten Abfrage von Informationen eine niederschwellige Entscheidungshilfe für das im jeweiligen Fall zu präferierende erneuerbare Heizsystem im Endkundenbereich angibt.

Planungstool zur Produktivitätssteigerung in der Angebotsphase

Im vom BMBF geförderten Projekt DiBesAnSHK (FKZ 02K20D010) soll die Entwicklung digitaler Planungstools zu einer Produktivitätssteigerung in den Planungs- und Installationsprozessen führen und so das Handwerk stärken. Am Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE wird zusammen mit Projektpartnern ein Lösungsansatz entwickelt, den Angebotsprozess für SHK-Betriebe zu vereinfachen, zu standardisieren und zu digitalisieren, mit dem Ziel, eine höhere Planungsqualität und die schnelle Umsetzung energieeffizienterer Anlagen zu erreichen.

Ein zentrales Forschungsfeld in diesem Zusammenhang ist die automatisierte Erfassung von Bestandsgebäuden. Für eine energetische Sanierung ist insbesondere die Identifikation der gebäudetechnischen Anlagen von Bedeutung. Hier wird ein Ansatz entwickelt, der es ermöglicht, auf Grundlage eines Satzes von Hauptkomponenten (Quellen, Erzeuger, Speicher und Übergabesysteme) automatisiert valide Anlagenkonfigurationen inklusive eines Hydraulikschemas abzuleiten. In Zusammenhang mit einer automatisierten Objekterkennung, die ebenfalls im Projekt DiBesAnSHK entwickelt wird, kann somit die Bestandsanlage schnell ermittelt und digital repräsentiert werden. Das digitale Anlagenschema

kann dann als Basis für die Konfiguration eines Sanierungsvorschlages verwendet werden. Ziel ist es, auf Basis der ermittelten und digital repräsentierten Anlagenkonfigurationen eine detaillierte Planung, Dimensionierung und anschließend eine automatisierte Angebotserstellung erfolgen zu lassen oder sie im Nachhinein zur Dokumentation des Umbaus zu nutzen.

Dabei wird ein zweistufiger Ansatz verfolgt: Im ersten Schritt werden die erkannten Komponenten zu einem schlüssigen Energieflussschema verbunden. Dieses kann bereits zur Analyse und ggf. Simulation von Systemvarianten verwendet werden. Im zweiten Schritt werden die hydraulischen Komponenten (Ventile, Pumpen, Klappen) hinzugefügt und praxisrelevante Hydraulikschemas generiert. Das entwickelte Konzept berücksichtigt bei der Generierung der Anlagenkonfigurationen sowohl energetische und thermische Randbedingungen als auch hydraulische Grundsaltungen. Eine prototypische Implementierung des Ansatzes ist für die Identifizierung von Anlagen im Bestand ausgelegt. Als weiterer Anwendungsfall ist die automatisierte Analyse und Auswahl von Sanierungskonzepten geplant [6].

Verbrauchsminderung durch Wärmebedarfsanzeige und Anlagenregelung bei Kaminöfen

Die verfügbaren Biomassen – und hier zunehmend auch Holz aus dem Wald für die Verbrennung im häuslichen Bereich – sind begrenzt und dürfen daher nur in effizienten und effektiven Heizungsanlagen bei gleichzeitig minimierten Luftschadstoffemissionen genutzt werden.

Eine Verbrauchsminderung und damit auch eine daraus resultierende Schadstoffminderung kann zeitnah erreicht werden, wenn Kleinf Feuerungsanlagen in die Gebäudeversorgungssysteme integriert und automatisiert geregelt werden, um insbesondere das sehr subjektive Empfinden und darauf basierende Handeln der Bediener zu begrenzen [7]. Das bedeutet, dass die Holzfeuerung nur dann betrieben werden darf bzw. kann, wenn andere erneuerbare Wärmequellen nicht verfügbar sind und die Raumtemperatur eine zu definierende Temperaturgrenze unterschreitet. Über die sensorische Erfassung der Wohnbedingungen im Aufstellraum von Einzelraumfeuerungen können die Nutzenden über den Heizbedarf informiert werden und die Holzheizung geregelt werden. Heute verfügbare Verbrennungsluftregelungen lassen sich vergleichsweise einfach auf Heizbedarfsanzeigen und Heizungsregelungen erweitern. Blaue Engel-Kamin-

öfen sind mit elektronischen Regelungen ausgerüstet. Die anstehende Revision des Blauen Engels sollte die Effektivität und Effizienz der Feuerungen als wichtiges Kriterium stärker in den Vordergrund stellen. Dabei sind die Heizbedarfsanzeige und -regelung, die Systemintegration, die Effizienz und Effektivität und auch weitere Feuerungsarten wie Speicherfeuerstätten in den Blauen Engel als Kriterien aufzunehmen.

Automatisierte Analyse von Wärmезentralen, Gebäudeinformationssysteme (BIM) und kostengünstige Solaranlagen

Das Erreichen der anspruchsvollen Klimaschutzziele im Gebäudebereich erfordert neue architektonische und anlagentechnische Lösungen. Fassadenintegrierte solare Technologien bieten dafür einen vielversprechenden Ansatz, konnten sich aber bisher am Markt noch nicht etablieren. Gründe dafür sind sowohl in den einzelnen Phasen ihres Lebenszyklus (LC) als auch bei den gewerkeübergreifenden Aspekten zu finden.

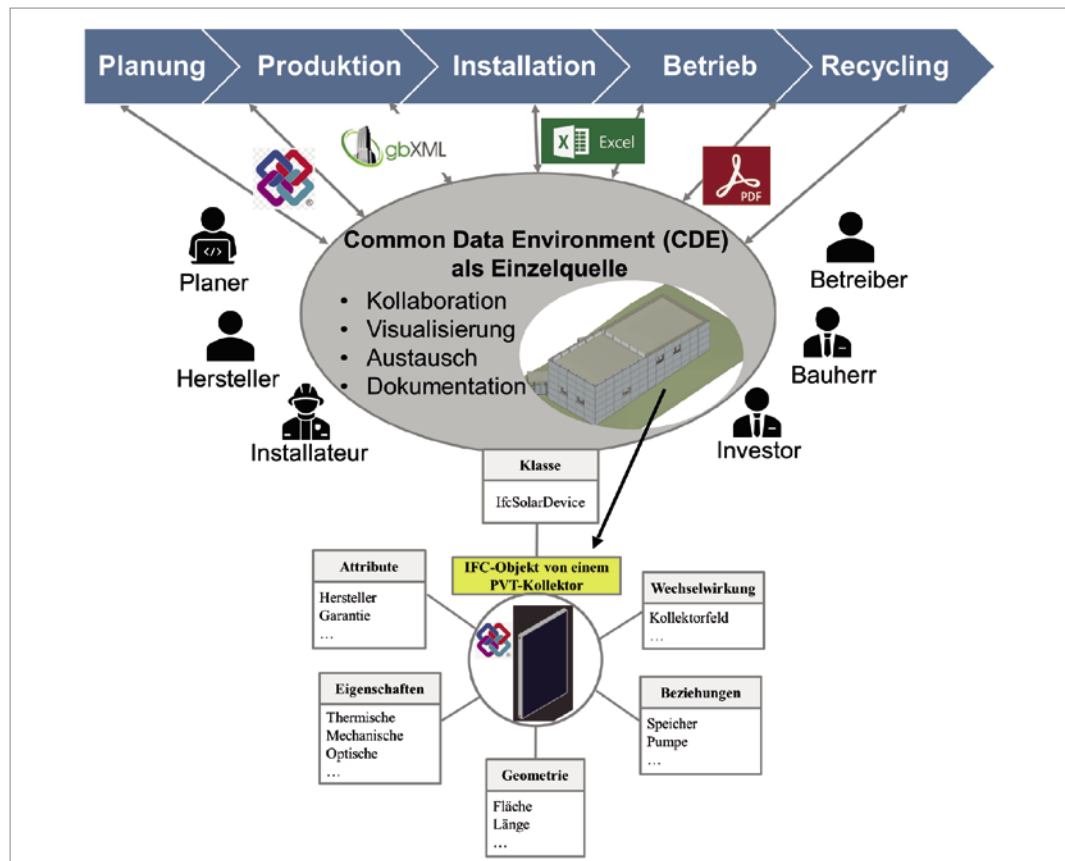
Im Rahmen des vom BMWK geförderten Verbundvorhaben „BIMPV – Retrospektiver BIM-Ansatz zur lebenszyklusorientierten Integration von BIPV-Systemen in der Gebäudehülle“ (FKZ 03EN1010B) wird

anhand eines Demonstrationsgebäudes der gesamte Lebenszyklus von gebäudeintegrierten photovoltaischen und photovoltaisch-thermischen Anlagen über Planung, Produktion, Montage, Betrieb bis zum Recycling betrachtet.

Für die gewerke- und phasenübergreifende Analyse und Optimierung kommt die digitale Methode Building Information Modeling (BIM) zum Einsatz. Alle lebenszyklusrelevanten Informationen eines Bauwerks können mit der BIM-Methode modellbasiert, digital und konsistent zentral erfasst, verwaltet und zur optimalen transparenten Kommunikation zwischen allen an den verschiedenen Bauprojektphasen beteiligten Akteuren ausgetauscht werden (► *Abbildung 3*).

Besonders im Bereich der Solarthermie ist die Anwendung der BIM-Methode aktuell noch ein Thema der Forschung, jedoch zeigt sich die BIM-Methode hierfür als vielversprechend. Das ISFH führt im Vorhaben daher schwerpunktmäßig Ertragssimulationen und -vorhersagen, sowie Betriebsanalysen an PV- und PVT-Systemen durch. Die am Demonstrationsobjekt gewonnenen Erkenntnisse werden durch den Aufbau eines PVT-Fassadenteststands am ISFH ergänzt. Anhand von Labor- und Feldmessungen am Teststand wird ein BIM-basiertes Modell für die PVT-Fassade entwickelt, das sowohl zur Betriebsanalyse als auch zur Energiesimulation verwendet wird.

Abbildung 3
BIM:
 Building Information Modeling-Schema mit Darstellung der Informationen eines zu entwickelnden PVT-Kollektormodells
 (Quelle: ISFH)



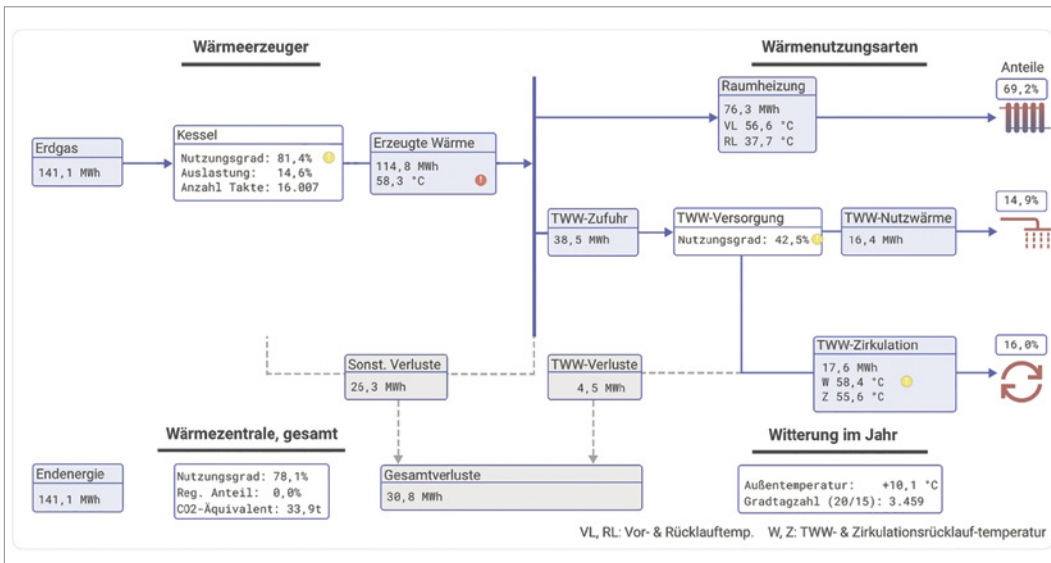


Abbildung 4
Grafische Kurzzusammenfassung eines Jahresberichtes
(Quelle: ISFH)

Automatisierte Analyse von Wärmezentralen

Das Projektziel im Forschungsprojekt „Feldanalyse zur Betriebs-Optimierung von Mehrfamilienhäusern“, kurz FeBOP-MFH, ist die Entwicklung eines praxistauglichen und in der Breite einfach anwendbarem Mess- und Analyseverfahren zur Effizienzbewertung und Optimierung von Wärmezentralen. In dem vom BMWK geförderten Projekt (FKZ: 03ET1573A) wurde dazu vom ISFH ein systemanlagenunabhängiges Messkonzept entwickelt und in über 30 Wärmezentralen von Mehrfamilienhäusern umgesetzt.

Mit dem FeBOP-Messsystem können Anlagenbetreiber, aber auch Planer und Handwerker einen ineffizienten Betrieb der Wärmezentrale oder ihrer Komponenten schnell feststellen und lokalisieren. Eine anschließende Optimierungsmaßnahme kann mit den Informationen des Messsystems außerdem zielgerichtet umgesetzt werden. Die Auswertungen einer Wärmezentrale erfolgen in FeBOP anhand von automatisierten Monats- und Jahresberichten (► *Abbildung 4*).

Für eine anstehende Modernisierung kann beispielsweise mit dem Jahresbericht eine Heizungsanlage auf ihre Wärmepumpentauglichkeit überprüft werden. Für den Fall, dass ein Wechsel des Wärmeerzeugers ansteht, ist die verbrauchsbasierte Wärmeerzeugerauslegung eine wichtige Information zur Vordimensionierung. Ein Anlagenvergleich mit dem Gesamtbestand anhand von ausgesuchten Kennzahlen ist ein zusätzliches Werkzeug von FeBOP und kann unter anderem der Priorisierung von Maßnahmen im Bestand dienen (► *Abbildung 5*).

Ein Effizienzmonitoring in Wärmeversorgungsanlagen beschleunigt und sichert den Weg zu einer CO₂-minimierten Wärmeversorgung bei der Planung, Einrichtung und dem Betrieb. Das grundsätzliche Messkonzept ist auch in anderen Gebäuden wie Hotels, Schulen, Verwaltungs- und Gewerbegebäuden etc. anwendbar. Der Leitfaden zur Planung und Installation der Messtechnik [8] richten sich daher nicht nur an die Wohnungswirtschaft, sondern auch an Energieberater, das Heizungshandwerk, Planer und Mitarbeitende im Gebäudemanagement.

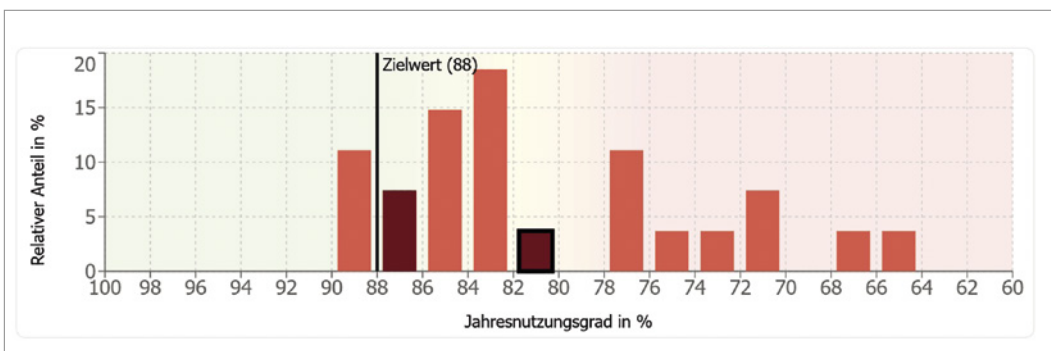
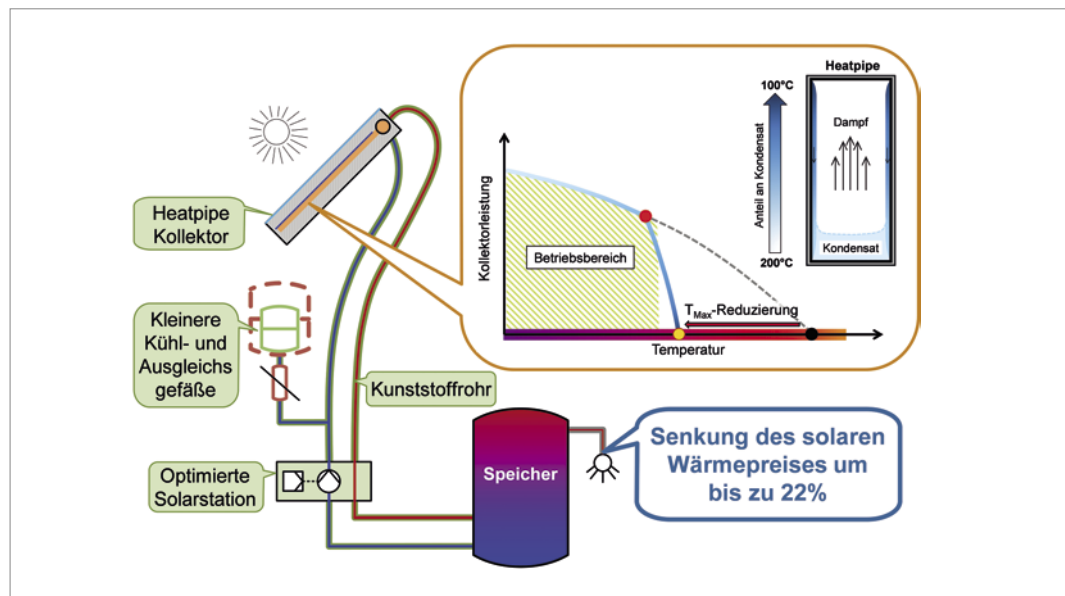


Abbildung 5
Anlagenvergleich von Wärmeerzeugern mit Gas als Endenergieträger
(Quelle: ISFH)

Abbildung 6
**Innovatives
 Systemkonzept für
 Wärmerohrkollektoren**
 (Quelle: ISFH)



Kostengünstige, zuverlässige und vereinfachte Solaranlagen

Kostensenkung, einfache Installation und ein zuverlässiger Betrieb von Solaranlagen sind entscheidende Voraussetzungen für eine beschleunigte Marktdurchdringung dieser erprobten Technologie. Wärmerohrkollektoren können die thermomechanischen Lasten in Solarkreisen bei Stagnation eigensicher begrenzen und bieten hierzu einen vielversprechenden Lösungsansatz. Im Forschungsvorhaben HP-SYS (FKZ: 03ETW 005A), gefördert vom BMWK, wurden sowohl Flach- als auch Vakuumröhrenkollektoren mit Wärmerohren (engl. Heatpipes) hinsichtlich ihrer Leistungsfähigkeit und der Maximaltemperatur optimiert und im Rahmen von Labor- sowie Feldtests untersucht. Im Stagnationsfall (Anlagenstillstand bei voller Sonneneinstrahlung), können kritische Temperaturen und Verdampfung im Solarkreis eigensicher vermieden werden. Darauf aufbauend ist ein neues Systemkonzept entwickelt worden, was beispielsweise auf polymerbasierten Komponenten im Bereich der Rohrleitung und Solarstation sowie einer deutlich einfacheren Druckhaltung beruht (► *Abbildung 6*).

Im Rahmen der zweiten Phase des Projekts wurden fünf Demonstrationsanlagen in der Praxis realisiert und deren Betrieb über insgesamt zwei Jahre wissenschaftlich begleitet. Es konnte nachgewiesen werden, dass das innovative Systemkonzept zu einer Senkung der Investitionskosten von bis zu 16% führte und zudem der Aufwand für Wartung und Instandsetzung deutlich reduziert werden konnte. Unter Berücksichtigung der im Lebenszyklus einer Anlage (25 Jahre) auftretenden Kosten ergibt sich eine Senkung des Wärmepreises von bis zu 22% (Levelized Cost of Heat) im Vergleich zum Stand der Technik.

Fazit und Ausblick

Die vorgestellten und weitere in der Forschung und Entwicklung befindlichen Lösungen sowie vor allem die digitalen Beratungsansätze und Expertensysteme können signifikant dazu beitragen den bestehenden Fachkräftemangel zu entschärfen. Die im Vergleich zu Gasthermen deutlich komplexeren Wärmelösungen lassen sich mittels Online-Hilfsangeboten sowohl in der Beratung als auch in der konkreten Umsetzung und Installation vereinfachen, so dass der vorbereitende Schulungsbedarf deutlich reduziert wird. Die FVEE-Einrichtungen bieten dafür vielfältige Lösungsansätze an und entwickeln diese kontinuierlich weiter. Für eine erfolgreiche Wärmewende muss die Politik u. a. für öffentliche, glaubwürdige Informations- und Unterstützungsplattformen sorgen, die öffentlich finanziert und ausreichend beworben werden. Das muss eine kontinuierliche Pflege der Plattformen und der Tools einschließen.

Alle diese Lösungen sollten eingebettet sein in die Umsetzung eines konsequenten Wärmewende-Fahrplans inklusive einer entsprechenden Weiterentwicklung der Politikinstrumente, z. B. gemäß 6-Punkte-Sofortprogramm des Wuppertal Instituts.

Literatur

- [1] Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (2022). Zeitreihen zur Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland unter Verwendung von Daten der Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik (AGEE-Stat) (Stand: Februar 2022)
- [2] Bundesverband der Deutschen Heizungsindustrie (2021). Gesamtbestand zentrale Wärmeerzeuger 2020. https://www.bdh-industrie.de/fileadmin/user_upload/Pressegrafiken/2021/Diagramm_Gesamtzahl_Waermeerzeuger_2020_DE.pdf (Zugriff: 18.05.2022)
- [3] Bundesverband der Deutschen Heizungsindustrie (2022). Marktentwicklung Wärmeerzeuger Deutschland 2012–2021. https://www.bdh-industrie.de/fileadmin/user_upload/Pressegrafiken/Marktstruktur_zehn_Jahre_2021_DE_022022.pdf (Zugriff: 06.04.2022)
- [4] Thomas, S., Schüwer, D., Vondung, F., Wagner, O. (2022). Heizen ohne Öl und Gas bis 2035 – ein Sofortprogramm für erneuerbare Wärme und effiziente Gebäude. Im Auftrag von Greenpeace e.V.
- [5] Schmidt-Baum, T., García Laverde, G., Pomsel, D., Szarka, N., Lenz, V. (2021). „Handwerkerschafts-Dilemma“ beim Umstieg auf Biomasseheizanlagen Ölersatz Biomasse Feuerung. In Tagungsband Rostocker Bioenergieforum 2021
- [6] Mattmüller, J., Preintner, P., Benndorf, G.A. (2022). Automatisierte Generierung von digitalen Anlagenschemata. BauSIM
- [7] Köhler, M., Hennig, P., Yanev, D. co2online (2018). Die Zusatzheizung – Nutzung ergänzender Heizsysteme im Gebäudebereich. Berlin. <https://www.co2online.de/fileadmin/co2/research/zusatzheizung-studie.pdf>
- [8] Institut für Solarenergieforschung Hameln (2022). Leitfaden für Handwerker, Planer und Energiedienstleister: Monitoringsystem zur Effizienzbewertung von Wärmeeinheiten. https://www.klimaschutz-niedersachsen.de/FeBOP-Broschure_2022_RL.pdf?m=1654854719&

Multikriterielle Nachhaltigkeitsbewertung im Rahmen kommunaler Wärmetransformationskonzepte



IZES
Prof. Dr.
Katharina Gapp-Schmeling
gapp-schmeling@izes.de

DLR
Dr. Patrik Schönfeldt
patrik.schoenfeldt@dlr.de

KIT
Dr. Martina Haase
martina.haase@kit.edu

Dr. Christine Rösch
christine.roesch@kit.edu

Wuppertal Institut
Dietmar Schüwer
dietmar.schuewer@wupperinst.org

ZSW
Andreas Püttner
andreas.puettner@zsw-bw.de

Einleitung

Kommunale Wärmetransformationsprojekte verfolgen verschiedene Ziele gleichzeitig. In der Regel soll die Transformation einen Beitrag leisten, um die Treibhausgasemissionen der Wärmeversorgung zu senken. Gleichzeitig stehen aber weitere Ziele, u. a. die Sozialverträglichkeit, Akzeptanz und wirtschaftliche Tragfähigkeit im Fokus der Akteure. Dabei muss eine einseitige Zieloptimierung vermieden werden. Darüber hinaus erscheint es sinnvoll, den Beitrag der jeweiligen Konzepte zu den Nachhaltigkeitszielen im Blick zu behalten.

Im Kontext kommunaler Wärmetransformationsprojekte geht es auf der Bedarfsseite darum, die Energieverbräuche für Raum- und Prozesswärme zu senken. Die Akteure auf Seiten der Abnehmer und Wärmenutzer:innen sind u. a. gewerbliche Unternehmen, die Wohnungswirtschaft, die öffentliche Hand und die Bewohner:innen.

Auf der Versorgungsseite muss die Wärmebereitstellung von fossilen Energieträgern umgestellt werden auf regenerative Energien, wie Bioenergie, Solarthermie, Geothermie, Umgebungswärme und industrielle Abwärme. Daher treten hier als Akteure der Wärmewende nicht mehr nur Energieversorgungsunternehmen, Stadtwerke und Kommunen, sondern bspw. auch Industrieunternehmen als Abwärmequellen und Selbsterzeuger auf.

Dieser Beitrag ordnet zunächst eine multikriterielle Nachhaltigkeitsbewertung in das Vorgehen kommunaler Wärmetransformationsprojekte ein. Anschließend werden Ansätze einer multikriteriellen Nachhaltigkeitsbewertung aus Projekten von FVEE-Mitgliedseinrichtungen dargestellt. Der dritte Abschnitt schließlich zeigt, wie diese in der Interaktion und Kommunikation mit den Akteuren genutzt werden können.

Kommunale Wärmetransformationsprojekte sind durch vier Phasen geprägt:

1. Es müssen vor Ort lokal die vorhandenen Potenziale regenerativer Wärmequellen (inkl. nicht vermeidbarer Abwärme) identifiziert werden.

Bereits in dieser Phase ist es entscheidend, dass die Akteure vor Ort sich als Partner und Verbündete verstehen.

2. In der zweiten Phase müssen verschiedene Transformationsoptionen konzeptionell gegenübergestellt werden. In dieser Phase kann die Nachhaltigkeitsbewertung helfen, Stärken und Schwächen der einzelnen Konzepte zu erkennen und sie systematisch weiterzuentwickeln. Bei der Bewertung der einzelnen Varianten werden die Schlüsselakteure und ihre Interessen berücksichtigt.
3. In der dritten Phase ist die technische Machbarkeit detaillierter zu untersuchen.
4. In der Umsetzung sollte schließlich geprüft werden, ob die erwarteten Ergebnisse erreicht werden konnten. So können Verbesserungen für nachfolgende Wärmetransformationsprojekte initiiert werden.

Nachhaltigkeitsbewertung – Ansätze und Ergebnisse

In diesem Abschnitt werden Ansätze einer multikriteriellen Nachhaltigkeitsbewertung aus Projekten von FVEE-Mitgliedern vorgestellt. Dies sind der Ansatz zur multikriteriellen Entscheidungsanalyse des KIT (Karlsruher Institut für Technologie), die Nachhaltigkeitsbewertung kommunaler Wärmeversorgungs-lösungen aus dem KoWa-Projekt des IZES (Institut für Zukunftsenergie- und Stoffstromsysteme), eine multikriterielle Bewertung von Wärmeversorgungs-technologien durch das WI (Wuppertal Institut) im Rahmen des Kompetenzzentrums Virtuelles Institut Strom zu Gas und Wärme NRW und die zeitabhängige Bewertung erneuerbarer Energien durch das DLR (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V.).

Multikriterielle Entscheidungsanalyse (KIT)

Die multikriterielle Entscheidungsanalyse (englisch: Multi Criteria Decision Analysis – MCDA) ermöglicht die frühzeitige Einbindung aller Akteursgruppen in den Entscheidungsprozess. Im Rahmen der MCDA

werden die zu bewertenden Transformationsoptionen und die verwendeten Bewertungskriterien zu Beginn und möglichst gemeinsam mit den unterschiedlichen Akteuren festgelegt. Dieses Vorgehen ermöglicht eine frühzeitige Berücksichtigung der verschiedenen Positionen und Interessen. Bei der Analyse der Alternativen werden mit Hilfe von technischen, ökonomischen, ökologischen und sozialen Kriterien quantitative und qualitative Informationen zu den Technologiealternativen generiert. Mit Hilfe von Methoden der MCDA können die Kriterien anschließend gewichtet und je Alternative aggregiert werden, um eine Aussage zur Vorteilhaftigkeit der Alternativen unter Einbeziehung aller gewählten Kriterien treffen zu können. Während des gesamten Bewertungsprozesses, insbesondere bei der Auswahl und Gewichtung der Bewertungskriterien, erfolgt die aktive Einbindung der Akteure. Unterstützt wird dieser Prozess durch ein Open-Source MCDA-Tool des KIT (<https://portal.iket.kit.edu/projects/MCDA/>). Dieser Ansatz kann nicht nur für die Bewertung von Wärmeversorgungslösungen, sondern grundsätzlich für die Bewertung von Technologiealternativen eingesetzt werden (Haase et al. 2021; Haase et al. 2022).

Nachhaltigkeitsbewertung kommunaler Wärmeversorgungsoptionen (IZES)

Im Rahmen des Forschungsprojektes KoWa (Wärme-wende in der kommunalen Energieversorgung) wurden in sechs Untersuchungsgebieten verschiedene Wärmeversorgungsoptionen konzipiert und anhand einer multikriteriellen Nachhaltigkeitsbewertung verglichen. Der Bewertungsrahmen wurde auf Basis der Theorie der Nachhaltigen Ökonomie entwickelt. Dabei wurde berücksichtigt, dass alle zum Einsatz kommenden Instrumente und Technologien wie Wärmeversorgungslösungen nach ihrem Beitrag zu den Zielen einer nachhaltigen Entwicklung beurteilt werden müssen (Rogall und Gapp-Schmeling 2021: Kap. 1 & 8). Neben dem Zielsystem der Nachhaltigen Ökonomie berücksichtigt der Bewertungsansatz außerdem die UN-Nachhaltigkeitsziele (UN 2015) und bietet so eine umfassende Möglichkeit zur Identifikation von Stärken und Schwächen der konzipierten Wärmeversorgungslösungen in allen drei Nachhaltigkeitsdimensionen. Auch dieser Ansatz kann nicht nur für die Bewertung von Wärmeversorgungslösungen, sondern grundsätzlich für die Bewertung von Technologiealternativen, Instrumenten oder auch zum Ländervergleich eingesetzt werden (Gapp-Schmeling 2022).

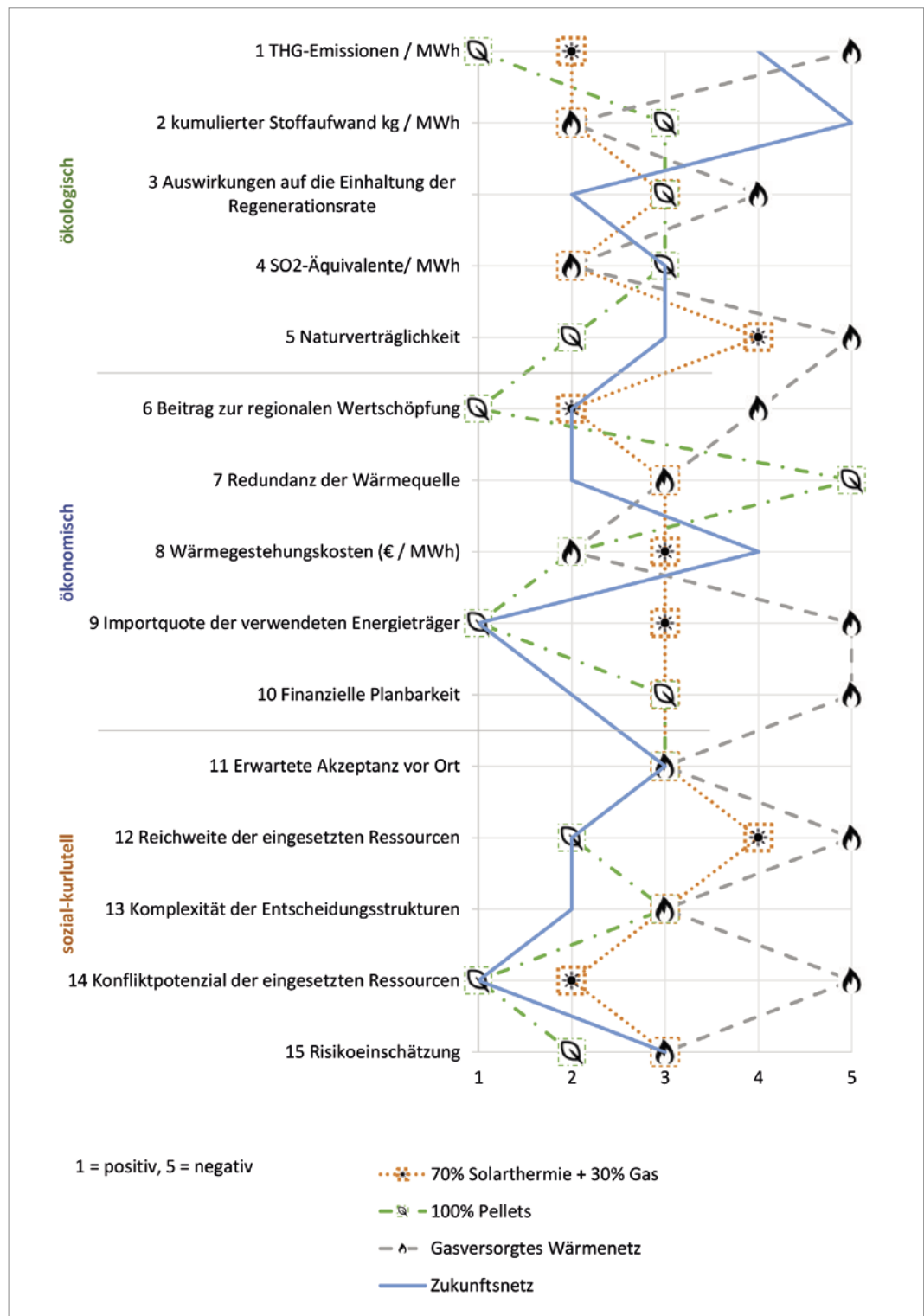
In jeder der drei Nachhaltigkeitsdimension wurden fünf Bewertungskriterien definiert und durch spezifische Indikatoren und Bewertungsregeln mit je fünf Bewertungsstufen operationalisiert. Die Indikatoren beruhen auf quantitativen und qualitativen Informationen. Um hinsichtlich der quantitativen Indikatoren, z. B. den Treibhausgasemissionen mit vergleichbaren Werten zu arbeiten, wurden die spezifischen Emissionen der jeweiligen Optionen mit Hilfe der Datenbank GEMIS (Globales Emissions-Modell integrierter Systeme) ermittelt (IINAS 2021) und in die Bewertungsstufen eingeordnet. Um die Stärken und Schwächen der einzelnen Versorgungsoptionen in den insgesamt 15 Kriterien vergleichen zu können, wird die Bewertung in einem Profilliniendiagramm dargestellt (► *Abbildung 1*) (Gapp-Schmeling 2022).

Multikriterielle Bewertung von Power-to-heat (PtH) und Vergleich zu anderen Wärmeversorgungsoptionen (WI)

Im Rahmen des Projektes „Virtuelles Institut Strom zu Gas und Wärme NRW“ wurde eine multikriterielle Bewertung von sieben Technologien mit insgesamt 13 Kriterien entwickelt, um PtH-Technologien (Power-to-Heat) mit anderen leitungsgebundenen Wärmeversorgungstechnologien zu vergleichen. Die ersten sechs Kriterien sind deskriptiv und dienen der Kurzbeschreibung der Technologien, sie beinhalten u.a. den thermischen Leistungs- und Temperaturbereich, Anwendungs- und Einsatzbereiche sowie Synergien und Optionen zur Sektorkopplung. Die übrigen sieben Kriterien werden in einem fünfstufigen System von sehr positiv bis sehr negativ bewertet. Die Visualisierung der Bewertungsergebnisse erfolgt durch eine Farbskala, bei der positive Bewertungen grün und negative rot dargestellt werden.

Die farblich zusammenfassende Kurzübersicht (► *Abbildung 2*) ermöglicht auch für interessierte Laien eine verständliche und schnell erfassbare multikriterielle Einordnung der Stärken und Schwächen der betrachteten Wärmeerzeugungsoptionen. Zusätzlich liegt als Ergebnis eine ausführlichere Matrix aus 91 Zellen mit jeweiliger individueller Bewertung und Kurz-Beschreibung vor. Darin werden auch die Bedingungen genannt, die zu einer teilweise großen Bandbreite bei der qualitativen Bewertung (z. B. bei Bioenergie von „++“ bis „-“) führen können (Emonts et al. 2022).

Abbildung 1
Bewertung der Beispielkonzepte in KoWa:
 Das Zukunftsnetz beruht auf 25 % Solarthermie, 60 % Umgebungswärme, 15 % Biomasse, Strom zu 50 % aus lokalen EE.
 (Quelle: IZES, nach Gapp-Schmeling 2022)



Zeitabhängige Bewertung erneuerbarer Energien (DLR)

Im Projekt Energetisches Nachbarschaftsquartier (ENaQ) lag der Schwerpunkt der Bewertung in der Zeitabhängigkeit von erneuerbaren Energien (EE). Über die Sektorenkopplung beeinflusst die Wärme-

erzeugung den Stromsektor. Dort ist eine dynamische Emissionsbewertung (Beispiel: <https://www.agora-energiewende.de/service/agorameter/>) sinnvoll. Dabei wurde die Wärmeerzeugung mit einem Blockheizkraftwerk (BHKW) einer Wärmepumpe indirekt gegenübergestellt. Bewertet wurde die zeitabhängige CO₂-Intensität der Stromerzeugung.

Für die Emission des BHKWs ist der Gasverbrauch angesetzt. Emissionen, die durch Wärmeerzeugung mit einer Wärmepumpe entstehen würden, wurden gutgeschrieben.

Es zeigt sich, dass ein BHKW nach dieser Metrik mit dem EE-Ausbau seltener (30% statt 50% der Zeit) eine ökologisch bessere Option ist. Zu beachten ist dabei, dass sich durch Wärmespeicher günstige Zeitpunkte bei ausreichend dimensionierten Wärmeerzeugern besser ausnutzen lassen. So kann mit einem Wärmespeicher von einem Tag das BHKW zu ca. 75% (mit EE-Ausbau: 45%) und die Wärmepumpe zu ca. 80% (mit EE-Ausbau 90%) zu ökologisch sinnvollen Zeitpunkten eingesetzt werden (Klement et al. 2022).

Nutzen der Nachhaltigkeitsbewertung zur Akteursaktivierung

Für konkrete Projekte braucht es die Einbindung der Schlüsselakteure. Durch eine multikriterielle Nachhaltigkeitsbewertung können die Akteure vor Ort eine fundierte Entscheidung treffen, welche Optionen in der Umsetzung priorisiert werden sollen. Zudem schafft sie Transparenz und ermöglicht eine klare Kommunikation zwischen den Interessengruppen, welche Aspekte aus ihrer Sicht jeweils lokal besonders wichtig sind.

Neben der Begleitung konkreter Projekte vor Ort kann eine Nachhaltigkeitsbewertung auch im Sinne eines Award-Systems zur Aktivierung verschiedener Akteursgruppen genutzt werden. So verfolgt das Projekt „Leitstern Energieeffizienz Baden-Württemberg“ das Ziel, die Sichtbarkeit der Energieeffizienz zu

steigern und die Akteure auf Ebene der Stadt- und Landkreise zum Austausch und zum Lernen über Best Practice voneinander zu motivieren. Dazu werden die teilnehmenden Stadt- und Landkreise mittels eines umfassenden Indikatorensystems analysiert (2020 waren dies 53 Indikatoren) und die besten Kreise sowie besonders innovative Aktivitäten durch das Land Baden-Württemberg prämiert. Die Indikatoren gliedern sich in die Bereiche politisches Engagement mit einer Gewichtung von 40% und messbaren Erfolgen mit einer Gewichtung von 60%. Die Aktivierung der Kreise erfolgt neben der eigentlichen Auszeichnung, die alle zwei Jahre stattfindet, durch begleitende Workshops. Sie dienen als Informationsplattform für die Stadt- und Landkreise und ermöglichen insbesondere den Austausch mit externen Expert:innen aus Wissenschaft, Verbänden, Landesorganisationen und Ministerien. Der Erfahrungsaustausch erfolgt anhand der Ergebnisse und Einzelindikatoren. Durch die Vorstellung von Erfolgsbeispielen und die Diskussion von Problemfeldern können die Vertreter:innen der Kreise voneinander lernen und sich zu Hemmnisse und Lernerfahrungen austauschen (MUKE-BW 2021).

Ausblick

Die Ansätze einer multikriteriellen Nachhaltigkeitsbewertung können dazu beitragen, Interessensgruppen zu aktivieren und eine einseitige Zieloptimierung zu vermeiden. Diese Ausrichtung wird in den kommenden Jahren für alle Akteursgruppen erfolgskritisch werden. Inzwischen haben fast alle Bundesländer eine Nachhaltigkeitsstrategie verabschiedet und überprüfen die Zielerreichung regelmäßig. Dabei

Abbildung 2
Multikriterielle Bewertung von PtH im Vergleich zu anderen innovativen Wärmeversorgungsoptionen (Übersichtstabelle mit qualitativen Kriterien 7 bis 13)

Quelle: Wuppertal Institut

KRITERIUM	0 PtH		1 KWK	2 Geothermie	3 Bioenergie	4 Abwärme	5 Solarthermie
	Direktelektrisch (Kessel)	Wärmepumpe	Motor-BHKW / GuD/GT/DT/BZ	tief (> 400 m, i.d.R. ohne WP)	Biomasse / Biogas	industriell / kommunal	Gebäude / Freifläche
7 Dekarbonisierungspotenzial	+	++	++ bis o	++	++ bis o	++ bis o	++ bis o
8 Lokale Verfügbarkeit und Flächenbedarf (nur Erneuerbare Energien)	++ bis -	+	--	++ bis o	++ bis --	++	++ bis o
9 Pfadabhängigkeiten (Lock-in-Risiko) im Sinne des Klimaschutzes bzw. der THG-Neutralität	+ bis --	+ bis o	+ bis -	++	o	o	++
10 Beitrag zur Energie-/Exergie-Effizienz	+ bis --	++ bis +	++ bis +	++	++ bis -	++	++
11 Regelbarkeit und Flexibilisierungspotenzial	++	+	++ bis +	o	+ bis o	o	-
12 Infrastrukturbedarf (Netze)	o	o bis -	+ bis -	-	+ bis -	o	+ bis -
13 Akzeptanz a) gesellschaftlich b) Markt	+ bis o	++ bis o	++ bis o	+ bis -	+ bis -	++ bis +	++ bis o

werden die Länder künftig auch stärker die Kreise und Kommunen involvieren. Auch dadurch ist es für kommunale Akteure im Kontext der Wärmewende sinnvoll, die Auswirkungen einer geplanten Wärmeversorgung anhand von Nachhaltigkeitskriterien zu bewerten.

Darüber hinaus entfaltet die vorausschauende Nachhaltigkeitsbewertung im Licht der CSRD Berichterstattungspflicht (Corporate Sustainability Reporting Directive) besondere Bedeutung. Unter die Nachhaltigkeitsberichterstattungspflicht fallen ab dem Berichtsjahr 2025 alle großen Unternehmen (mehr als 250 Beschäftigte, Bilanzsumme > 20 Mio. Euro oder Nettoumsatz > 40 Mio. Euro). Damit muss auch eine Reihe von lokalen und kommunalen Unternehmen künftig im Lagebericht über ihre Nachhaltigkeitsleistungen berichten. Für diese Berichterstattung gilt – wie für den Jahresabschluss – eine Pflicht zur externen Prüfung (durch Wirtschaftsprüfer). Ferner gilt eine kollektive Verantwortung der obersten Leitung. Die Berichtspflicht schafft also erhöhte Transparenz. Ferner greifen die Kriterien auf die EU-Taxonomie zurück. Die Nachhaltigkeitsleistung kann damit künftig die Finanzierungsbedingungen (z. B. bei der Hausbank) beeinflussen.

Diese Berichterstattungspflicht ist letztlich ein Ausdruck des stärkeren gesellschaftlichen Interesses an der Nachhaltigkeitsleistung von Unternehmen und Organisationen. Die multikriterielle Nachhaltigkeitsbewertung von Wärmeversorgungskonzepten bietet die Möglichkeit die Auswirkungen einer Wärmeversorgung auf die Zielerreichung von Nachhaltigkeitszielen bereits frühzeitig zu berücksichtigen.

Quellen

- Emonts, B.; Keller, R.; Müller, M.; Hehemann, M.; Rauls, E.; Senner, J.; Redicker, C.; Imberg, C.; Herrmann, F.; Riese, J.; Schüwer, D.; Schneider, C.; Merten, F.; Meijer T.; Gardemann, U.; Theves, L.; Steffen, M. (2022): Virtuelles Institut Strom zu Gas und Wärme NRW, Abschlussbericht Kompetenzzentrum Virtuelles Institut – Strom zu Gas und Wärme, Band IV – Optimierung, Modellierung und Scale-up von PtX – Flexibilitätsoptionen. http://strom-zu-gas-und-waerme.de/wp-content/uploads/2022/07/KoVI-SGW_Abschlussbericht-Band-IV-M%C3%A4rz-2022-final_V1.pdf
- Gapp-Schmeling, K. (2022): Nachhaltigkeitsbewertung kommunaler Wärmeversorgungskonzepte, in: Rogall, H., Gapp-Schmeling, K. et. al. (2022): Jahrbuch Nachhaltige Ökonomie 2022 / 2023. Im Brennpunkt: Kommunale Wärmewende, S. 49-60, Marburg (Metropolis-Verlag).
- Gapp-Schmeling, K., Hewelt, F., Meyer, M., Rogall, H., Schmidt, C., Waldhoff, C., Welz, A., Wern, B. (2021): Nachhaltigkeitsbewertung kommunaler Wärmeversorgungsoptionen. KoWa-Berichte.
- Haase, M.; Wulf, C.; Baumann, M.; Ersoy, H.; Koj, J. C.; Harzendorf, F.; Mesa Estrada, L. S. (2022): Multi criteria decision analysis for prospective sustainability assessment of alternative technologies and fuels for individual motorized transport 2022. Clean technologies environmental policy. doi:10.1007/s10098-022-02407-w.
- Haase, M.; Baumann, M.; Wulf, C.; Rösch, C.; Zapp, P. (2021): Multikriterielle Analysen zur Entscheidungsunterstützung in der Technikfolgenabschätzung in: S. Bösch: Technikfolgenabschätzung, S. 306–320, Baden Baden (Nomos Verlagsgesellschaft).
- IINAS – Institut für Nachhaltigkeitsanalysen und -strategien (2021): GEMIS: Globales Emissions-Modell integrierter Systeme.
- Klement, Peter, Tobias Brandt, Lucas Schmeling, Antonieta Alcorta de Bronstein, Steffen Wehkamp, Fernando Andres Penaherrera Vaca, Mathias Lanezki, Patrik Schönfeldt, Alexander Hill, and Nemanja Katic (2022): Local Energy Markets in Action: Smart Integration of National Markets, Distributed Energy Resources and Incentivisation to Promote Citizen Participation in: Energies 15, no. 8: 2749. <https://doi.org/10.3390/en15082749>.
- MUKE-BW – Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg (27.09.2021): Leitstern Energieeffizienz – konzeption, URL: <https://um.baden-wuerttemberg.de/de/energie/informieren-beraten-foerdern/leitstern-energieeffizienz/konzeption>.
- Rogall, H., Gapp-Schmeling, K. (2021): Nachhaltige Ökonomie. Grundlagen der Wirtschaftswissenschaft Bd. 15. 3. Aufl. Marburg (Metropolis-Verlag).
- UN - United Nations (UN) (21.10.2015): Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development. Aktenzeichen: A/RES/70/1.

Umsetzung der urbanen Wärmewende im Quartier

Einleitung

Der Wärmesektor hat einen Anteil von rund 55 Prozent am deutschen Primärenergieverbrauch, wobei der Anteil klimafreundlicher Wärmeerzeugung (erneuerbare Energien und Abwärmenutzung) bislang aber noch sehr gering ist und unter 20 Prozent liegt. Entsprechend sind die Potenziale zur Erschließung von Dekarbonisierungserfolgen im Wärmesektor besonders groß. Ein Gelingen der Wärmewende ist daher zwingende Voraussetzung dafür, dass die nationalen Klimaschutzziele erreicht werden.

Gerade Städte spielen auf Grund des hohen Energie- und Ressourcenverbrauchs, der hohen örtlichen Dichte von Infrastrukturen und durch die Vielzahl von Akteuren eine zentrale Rolle bei der Energiewende und für den Klimaschutz. So bilden beispielsweise gewachsene Strukturen im Bestand und hohe Nutzungsdichten potenzielle Restriktionen für die Integration von Technologien zur effizienten Nutzung erneuerbarer Energiequellen. Städtische Quartiere sind gleichzeitig der sinnvollste Umsetzungsmaßstab für integrierte innovative Systeme, da hier die größten Synergieeffekte zwischen Effizienzmaßnahmen und nachhaltiger Energieerzeugung erschlossen werden können (Rohrig Schmidt et al. 2021).

Für die Umsetzung der Wärmewende allgemein und im Besonderen in urbanen Räumen sind 3 Säulen von entscheidender Bedeutung (Fraunhofer IWES/IBP 2017):

1. Effizienz entscheidet: Sie ist die tragende Säule der Dekarbonisierung. Aus diesem Grund ist die Sanierung des Gebäudebestandes weiterhin von äußerster Wichtigkeit, die Sanierungsquoten müssen steigen.
2. Schlüsseltechnologie Wärmepumpe: Eine massive Integration von Wärmepumpen im Bestand und in Neubauten ist nötig.
3. Schlüsseltechnologie Fernwärme: Wir benötigen einen massiven Ausbau der Wärmenetze, gerade in verdichteten urbanen Strukturen.

Die Bundesregierung hat mit der Einführung der verbindlichen Wärmeplanung ein entscheidendes Zeichen gesetzt, um die dringend erforderliche Planungssicherheit für die anstehenden Transformationsprozesse zu schaffen und die erforderlichen Investitionen anzureizen, gerade weil für die Wärmeversorgung in der Regel Investitionen mit hohem Kapitaleinsatz und langer Kapitalbindung in die Infrastruktur (etwa Wärmenetze) und in größere Wärmeerzeugungs- / Verteilungstechnik erforderlich sind.

Bei den kommunalen Wärmeplanungen sind die Quartiere von besonders großer Bedeutung, da in ihnen eine Vielzahl von Akteuren eingebunden werden muss. Die verschiedenen Interessen von Hausbesitzer*innen, der Wohnungswirtschaft, örtlichen Wärmenetzbetreibern, Gewerbe- und Industrieunternehmen sowie der kommunalen Verwaltung beziehungsweise der örtlichen Entscheidungsträger*innen aus der Politik, müssen dort koordiniert werden. Im Quartier entstehen die entscheidenden Planungsaufgaben, um Angebot (etwa in Form von nutzbarer Abwärme) und Nachfrage (beispielsweise für Raum- beziehungsweise Prozesswärme) in Einklang miteinander zu bringen.

Physisch ist das Quartier so wichtig, weil die leitungsgelungene Wärmeversorgung räumlich relativ stark begrenzt ist. Denn im Gegensatz zu anderen Energieträgern wie Strom und Gas, kann Wärme nur mit hohen Verlusten über weite Strecken transportiert werden. Entsprechend rücken auf der räumlichen Ebene Quartiere und Stadtteile mit ihren Infrastrukturen und akteursspezifischen Interessen ins Zentrum der urbanen Wärmewende.

Die wesentlichen Beiträge der anwendungsorientierten Forschung für die Umsetzung der Wärmewende beziehen sich in dem hier beschriebenen Kontext neben einer weiteren Technologieentwicklung, auf die Unterstützung der Transformationsprozesse durch die Erstellung von Planungswerkzeugen und im Rahmen von Energiesystemanalysen auf techno-ökonomische Analysen auf den unterschiedlichen Maßstabsebenen, was die nachfolgenden Beispiele zeigen:



Fraunhofer IEE

Dr. Dietrich Schmidt
dietrich.schmidt@iee.fraunhofer.de

DLR

Dr. Jacob Estevam-Schmiedt
jacob.estevamschmiedt@dlr.de

Fraunhofer ISE

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

ISFH

Bharat Chhugani
chhugani@isfh.de

IZES

Patrick Hoffmann
hoffmann@izes.de

Wuppertal Institut

Oliver Wagner
oliver.wagner@wupperinst.org

ZSW

Andreas Brinner
andreas.brinner@zsw-bw.de

Unterstützung der Umsetzung durch Planungswerkzeuge

Die intelligente Verwendung aktuell verfügbarer Informationen und der Einsatz von zeitlich aufgelösten Wärmelastprofilen bieten eine verlässliche und detailreiche Grundlage für Investitionsentscheidungen bei der Planung der Wärmeversorgung von Quartieren und Städten. Zur Bewertung von einzelnen Versorgungsvarianten werden mit dem im Fraunhofer IEE entwickelten Berechnungswerkzeug EQ City detaillierte Nutzwertanalysen durchgeführt. Dabei werden ökonomische, technische, ökologische und regulatorische Kriterien einbezogen und um Faktoren, wie Akzeptanz, Nutzerfreundlichkeit, Komplexität oder Innovationsgrad für eine Entscheidungsgrundlage erweitert (EQ City 2022).

Beim DLR wurde ein Optimierungsansatz entwickelt, der sowohl den Anlagenbetrieb als auch die Anlagendimensionierung hinsichtlich mehrerer Kriterien optimiert (Schmeling et al. 2020; Schmeling et al. 2022). Hierfür wird die allgemeine Anlagentopologie mit allen potenziellen Energieanlagenkomponenten mittels des Open-Source-Tools MTRESS abgebildet (Schonfeldt et al. 2022). Mit diesem Ansatz stehen die Pareto-optimalen Lösungen hinsichtlich Kosten, Emissionen und Eigenverbrauch zur Verfügung.

Untersuchung der Wärmewende in der kommunalen Energieversorgung

Die Unterstützung von kommunalen Versorgungsunternehmen bei der Entwicklung von nachhaltigen, auf Defossilisierung und Steigerung der Energieeffizienz ausgerichteten Wärmeversorgungssystemen steht im Forschungsprojekt KoWa im Zentrum. Konkret werden Zugangshürden und Hemmnisse bei der Implementierung oder der Erweiterung kommunaler Wärmenetze identifiziert. Darauf aufbauend werden sowohl technisch wie ökonomisch-juristisch abgestimmte Konzepte für eine nachhaltige, defossilisierte Wärmeversorgung für und mit den jeweiligen Akteuren vor Ort erstellt (KoWa 2022).

Umsetzungsbeispiel für ein klimaneutrales Stadtquartier „Neue Weststadt Esslingen“

Ziel des im Rahmen der Förderinitiative „Solar Bauen/ Energieeffiziente Stadt“ der Bundesministerien BMWK und BMBF geförderten Leuchtturmprojektes ist es, auf 12 ha des ehemaligen Güterbahnhofs in Esslingen ein neues Stadtquartier mit 85.000 m² Bauwerks-

Grundfläche und mehr als 550 Wohneinheiten zu errichten. Oberste Prämisse für die Gestaltung des Konzeptes ist es die CO₂-Emissionen für Wohnen und Mobilität unter 1 t pro Jahr und Person zu senken. Zentrales Element ist die Nutzung der Sektorenkopplung für einen maximalen Klimaschutzbeitrag. Hierbei ist die lokale Erzeugung von grünem Wasserstoff durch einen 1 MW_{el} Elektrolyseur für Mobilität und die Nutzung in der Industrie zentraler Baustein. Eine weitgehende Dekarbonisierung der Wärmeversorgung wird durch die Nutzung der Abwärme aus der Elektrolyse erreicht (Neue Weststadt 2022).

Entwicklung einer Nachkriegssiedlung zu einem Best-Practice Quartier „QUARREE100“

Die Entwicklung und Realisierung eines resilienten Energieversorgungssystems auf der Basis erneuerbarer Energien für das Bestandsquartier Rüsdorf Kamp der Kreisstadt Heide in Schleswig-Holstein ist Ziel dieses ebenfalls durch die Bundesministerien BMWK und BMBF geförderten Projektes. In diesem Vorhaben wird ein übertragbares Beispiel für ein städtisches Energieversorgungssystem mit Integration aller Energiesektoren (Elektro, Wärme, Mobilität) bearbeitet, wobei auch die Versorgung mit Wasserstoff als Sekundärenergiespeicher und Kraftstoff, sowie die Abwärme-Nutzung aus der lokalen Wasserstoffherzeugung systemdienlich integriert wird. Neben den energetischen Themen wird im Vorhaben den Aspekten Wohnen und Arbeiten, sowie Konzepten für alle Generationen besondere Aufmerksamkeit geschenkt (Zimmermann 2022).

Wärmeversorgung für das klimaneutrale Konversionsgelände Pfaff-Quartier

In innerstädtischen Gebieten mit hoher Wärmebedarfsdichte sind isolierte Quartierslösungen generell wenig erfolgversprechend, notwendig sind gesamtstädtische Wärmelösungen bzw. Lösungen für das gesamte Wärmenetzgebiet. Aber: Innovative Quartiere sind Keimzellen für die Transformation von städtischen Wärmenetzen. So zeigen die Erkenntnisse aus der Wärmeplanung dieses durch die Bundesministerien BMWK und BMBF geförderten Reallabors, dass gerade die Methodik für Machbarkeitsstudien zur Nutzung von industrieller Abwärme weiterentwickelt werden muss. In dem Vorhaben wurde die Abwärmenutzung aus einer Gießerei intensiv untersucht (technisch, ökonomisch, juristisch), jedoch nach Gesamtbewertung mangels ausreichender Wärmeverfügbarkeit leider nicht

umgesetzt. Dafür wird nun ein Niedertemperaturnetz gespeist aus dem Fernwärmerücklauf (Kaskadennutzung) und die Nutzung dezentraler Abwärme aus Kältemaschinen zur Umsetzung gebracht (Pfaff 2022).

Innovative „Kalte Nahwärme“ für ein Neubauquartier mit Mehrfamilienhäusern.

„Kalte Nahwärme“ arbeitet mit niedrigen Übertragungstemperaturen in der Nähe der Umgebungstemperatur. Für die Untersuchung eines Wärmeversorgungskonzeptes basierend auf „Kalter Nahwärme“ mit Wärmepumpen, Erdwärmesonden und PVT-Kollektoren wurde der Heizwärmebedarf direkt aus 3D-Gebäudemodellen bestimmt. Mittels Simulationsstudien konnte gezeigt werden, dass über die Regeneration des Erdreichs durch die Solarkollektoren die Flächenproblematik in dem Quartier gelöst werden konnte und sich so die Wärmegestehungskosten auf 16,4 ct/kWh reduzieren lassen.

Schlussfolgerungen

Zusammenfassend kann die Vielzahl der angesprochenen Aspekte und der Beiträge der anwendungsorientierten Forschung für die Umsetzung der urbanen Wärmewende im Quartier mit einigen Punkten zusammengefasst werden:

- Die größten Aufgaben und Herausforderungen liegen im Bestand. Unsere zukünftigen Städte und Quartiere existieren zumeist heute schon und haben teilweise große Wärmebedarfe.
- Städte und Gemeinden spielen eine zentrale Rolle als wesentliche Akteure bei der Umsetzung von Maßnahmen.
- 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, da viele nötige Technologien bereits vorhanden sind. Diese Integration kann mittels Vernetzung der Einzeltechnologien und über moderne Planungswerkzeuge, wie beispielsweise kommunale Wärmepläne und Potenzialbewertungstools, vorangebracht werden.

Literatur

- EQ City (2022): EQ-City – Planung der Wärmeversorgung für Quartiere und Städte, Homepage: <https://www.iee.fraunhofer.de/de/geschaeftsfelder/analyse-und-beratung/eq-city.html>, Zugriff am 01.12.2022
- Fraunhofer IWES/IBP (2017): Wärmewende 2030. Schlüsseltechnologien zur Erreichung der mittel- und langfristigen Klimaschutzziele im Gebäudesektor. Studie im Auftrag von Agora Energiewende, Berlin.
- KoWa (2022): KoWa – Wärmewende in der kommunalen Energieversorgung, Homepage: <https://www.kowa-projekt.de/>, Zugriff am 01.12.2022
- Neue Weststadt (2022): „KLIMANEUTRALES STADTQUARTIER – Leuchtturmprojekt Solares Bauen / Energieeffiziente Stadt in Esslingen am Neckar“, Homepage: <https://neue-weststadt.de/informationsbroschuere>, Zugriff am 01.12.2022
- Pfaff (2022): Pfaff-Reallabor, Homepage: <https://pfaff-reallabor.de/>, Zugriff am 01.12.2022
- Rohrig, Kurt; Schmidt, Dietrich et al. (2021): Technologien und Geschäftsmodelle für die urbane Energiewende – Energiesystem Stadt, Fraunhofer-Institut für Energiewirtschaft und Energiesystemtechnik IEE, Kassel.
- Schmeling, Lucas; Schönfeldt, Patrik; Klement, Peter; Vorspel, Lena; Hanke, Benedikt; Maydell, Karsten von; Agert, Carsten (2022): A generalised optimal design methodology for distributed energy systems. In: *Renewable Energy* 200, S. 1223–1239. DOI: 10.1016/j.renene.2022.10.029.
- Schmeling, Lucas; Schönfeldt, Patrik; Klement, Peter; Wehkamp, Steffen; Hanke, Benedikt; Agert, Carsten (2020): Development of a Decision-Making Framework for Distributed Energy Systems in a German District. In: *Energies* 13 (3), S. 552. DOI: 10.3390/en13030552.
- Schönfeldt, Patrik; Grimm, Adrian; Neupane, Bhawana; Torio, Herena; Duranp, Pedro; Klement, Peter et al. (2022): Simultaneous optimization of temperature and energy in linear energy system models. In: *2022 Open Source Modelling and Simulation of Energy Systems (OSMSES)*. 2022 Open Source Modelling and Simulation of Energy Systems (OSMSES). Aachen, Germany, 04.04.2022 - 05.04.2022: IEEE, S. 1–6.
- Zimmermann, Joris (2022): Quarree100. Beschlussvorschlag siehe „20190912_PV_Heide_Beschlussvorschlag-Q100-2019-01 mit Anhang“, Steinbeis-Innovationszentrum energieplus, Braunschweig.

Transformation in der Industrie: Herausforderungen und Lösungen für erneuerbare Prozesswärme

Der Beitrag stellt Ergebnisse aus der „AG Industrielle Prozesswärme“ des Thinktanks IN4climate.NRW in Zusammenarbeit mit dem wissenschaftlichen Kompetenzzentrum Sci4Climate.NRW vor. Hier wurde in einem mehrjährigen Stakeholder-Prozess unter Einbindung von Wissenschaft, Politik und Unternehmen der energieintensiven Industrie in NRW ein Diskussionspapier entwickelt, welches in einem „Vier-Stufen-Modell“ eine aus gesamtsystemischer Sicht optimale Vorgehensweise zur Dekarbonisierung bzw. Defossilisierung industrieller Prozesswärme aufzeigt [1], [2]. Flankierend werden über die Koautor:innen Technologie-Beispiele innerhalb des „Vier-Stufen-Modells“ aufgezeigt.

Im Jahr 2020 wurden mit 657 Terawattstunden (TWh) rund 28 % des gesamten deutschen Endenergiebedarfs im Industriesektor verbraucht. Davon entfallen wiederum mit 440 TWh zwei Drittel auf die industrielle Prozesswärme. Somit wurden rund 19 % des gesamten deutschen Endenergiebedarfs für industrielle Prozesswärme eingesetzt. Davon basiert mit 6 % (26 TWh) bisher nur ein Bruchteil auf erneuerbaren Energien. Weitere 8 % (34 TWh) werden aus Strom erzeugt, der zumindest mittelfristig das Potenzial zur vollständigen Dekarbonisierung hat. Die Industrie steht daher vor der gewaltigen Aufgabe, bis spätestens 2045, und somit innerhalb weniger

Jahrzehnte, die übrigen mindestens 86 % fossile industrielle Prozesswärmeerzeugung zu dekarbonisieren bzw. defossilisieren.

Die technischen Optionen in Form von erneuerbaren Wärmequellen (konzentrierende und nicht-konzentrierende Solarkollektoren, Geothermie und Umgebungswärme in Kombination mit Wärmepumpen), Abwärme, erneuerbarem Strom, Biomasse (inkl. Biogase) sowie alternativen Energieträgern (insbesondere Wasserstoff und synthetisches Methan) sind grundsätzlich am Markt verfügbar (► *Abbildung 1*). Gleichwohl besteht noch Forschungsbedarf zu einzelnen Technologien wie z. B. Hochtemperatur-Wärmepumpen oder -Wärmespeichern und insbesondere zur (hybriden) Integration verschiedener Wärmeerzeuger in industrielle Prozesse.

Dabei ist zu beachten, dass nicht alle erneuerbaren Energieträger und -Technologien an jedem Ort und zu jeder Zeit zur Verfügung stehen und sie eventuell auch nicht für jedes Temperaturniveau und jeden Anwendungsbereich (Prozesse, Branchen) technisch einsetzbar sind. ► *Abbildung 2* ordnet beispielhaft die Energieträger Geothermie (bis ca. 180 °C), Solarthermie (nicht-konzentrierend bis ca. 120 °C, konzentrierend bis ca. 400 °C), Biomasse (bis ca. 500 °C) sowie erneuerbarer Strom und Gase (bis über 1.500 °C) verschiedenen industriellen Prozessen unterschiedlicher Branchen zu.



Wuppertal Institut
Dietmar Schüwer
dietmar.schuewer@wupperinst.org

DLR
Dr. Thomas Bauer
thomas.bauer@dlr.de

Dr. Tobias Hirsch
tobias.hirsch@dlr.de

Fraunhofer ISE
Dr. Peter Nitz
peter.nitz@ise.fraunhofer.de

IN4climate.NRW
Tania Begemann
tania.begemann
@energy4climate.nrw

Dr. Stefan Herrig |
stefan.herrig@energy4climate.nrw

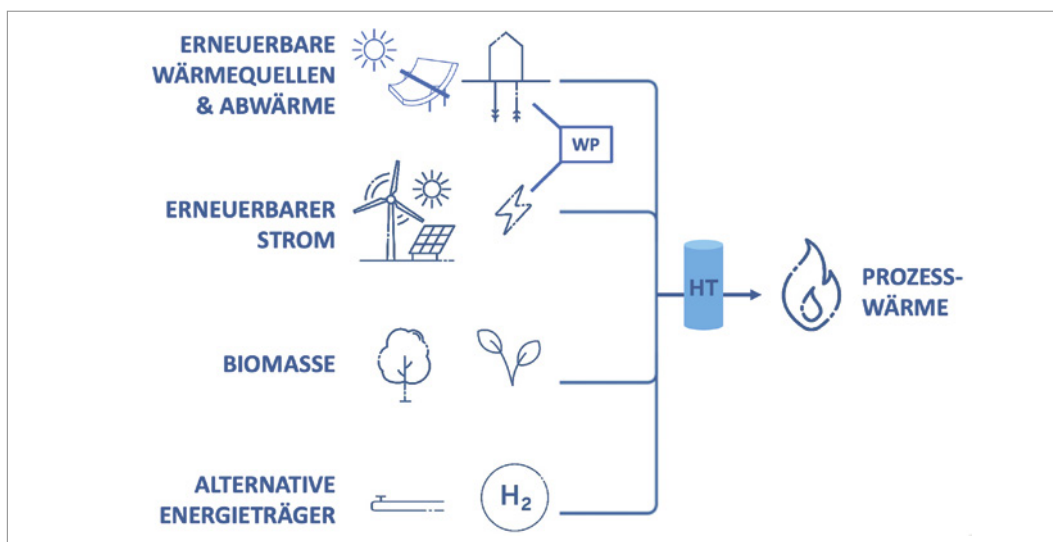
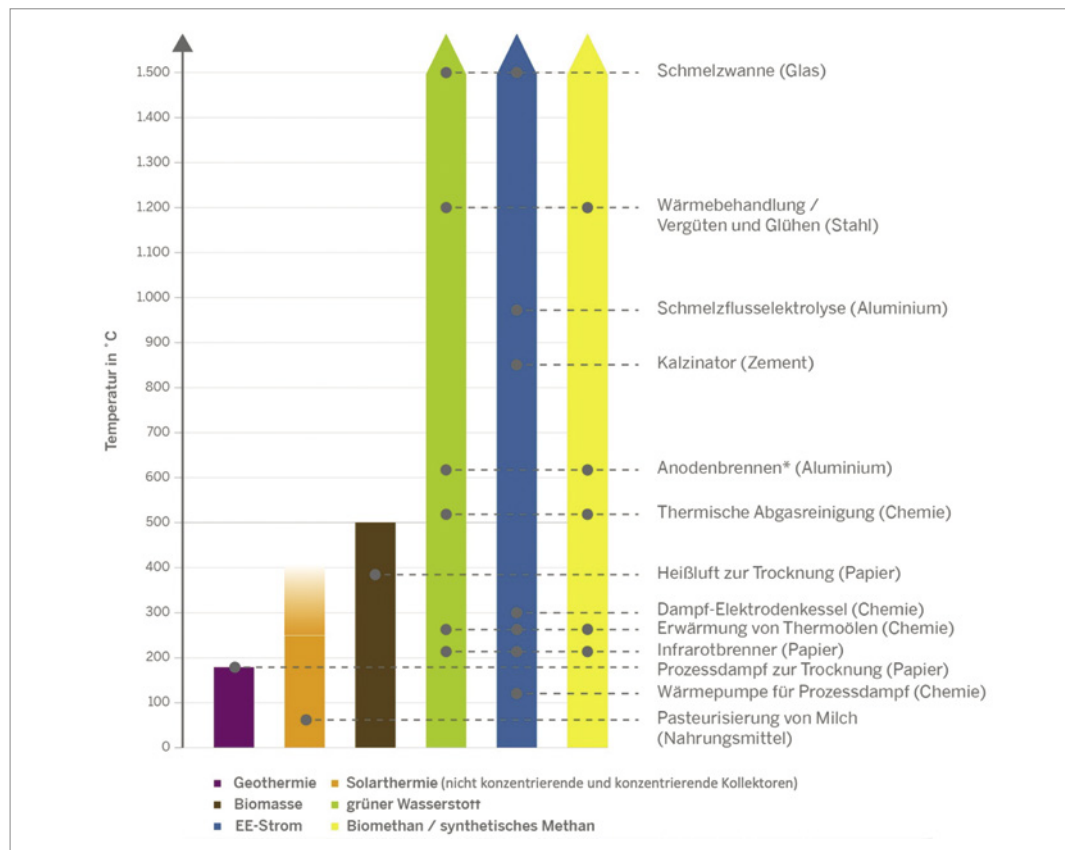


Abbildung 1
Technische Optionen zur Dekarbonisierung industrieller Prozesswärme
WP: Wärmepumpe,
HT: (Hochtemperatur-) Wärmespeicher
(Grafik: IN4climate.NRW, eigene Ergänzungen)

Abbildung 2
**Erneuerbare Wärme:
 erzielbare Tempera-
 turen und potenzielle
 Einsatzbereiche**
 (Grafik: IN4climate.NRW,
 eigene Ergänzungen)



Angesichts der anstehenden Dekarbonisierung industrieller Prozesswärme steht daher jedes Unternehmen perspektivisch vor der Herausforderung, für seine Prozesse technisch, potenziell, ökologisch und ökonomisch geeignete erneuerbare Erzeugungsstrukturen zu entwickeln. Dies erfordert i. d. R. eine detaillierte, einzelbetriebliche Untersuchung der erneuerbaren Erzeugungs- und Anwendungsoptionen vor Ort inklusive der Analyse des Aus- und Aufbaus von Transportinfrastrukturen für die Zuleitung von erneuerbarem Strom, Gasen und Fernwärme. Das in diesem Beitrag vorgestellte 4-Stufen-Modell kann diese Einzelanalyse nicht ersetzen, jedoch eine wichtige Handreichung sein auf dem Weg zur Transformation industrieller Prozesswärme von fossilen zu erneuerbaren Energien.

Das 4-Stufen-Modell zur Dekarbonisierung industrieller Prozesswärme

Das 4-Stufen-Modell zeigt eine aus gesamtsystemischer Sicht optimale Vorgehensweise zur Dekarbonisierung bzw. Defossilisierung industrieller Prozesswärme auf. Es besteht aus der Priorisierung dieser vier Schritte (► **Abbildung 3**):

1. Steigerung der Energie- und Exergieeffizienz
2. Erschließung erneuerbarer Wärmequellen

3. Elektrifizierung

4. Nutzung alternativer Energieträger

Übergeordnetes Ziel dieser Strategie ist es, den Energie- und Ressourcenverbrauch (inkl. vorgelagerter Erzeugungsketten) insgesamt zu minimieren, die Potenziale lokaler erneuerbarer Wärmequellen möglichst weitgehend zu erschließen und die Knappheit von teuren und nachhaltig begrenzt verfügbaren Energieträgern zu berücksichtigen. Im Folgenden wird näher auf die einzelnen Schritte der vierstufigen Kaskade eingegangen.

Stufe 1: Effizienz

Die erste Stufe spiegelt den Grundsatz „Efficiency First“ wider. Dies umfasst sowohl Dämmmaßnahmen zur Begrenzung der Abwärmeverluste, effiziente Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) als auch die Optimierung von Prozessen inklusive prozess- oder betriebsinterner Wärmerückgewinnung (aus Rauchgasen, Abwässern, Umgebungsluft und Strahlungswärme). Sind die internen Abwärmepotenziale ausgereizt, so sollte geprüft werden, inwieweit die dann noch unvermeidlich entstehende Abwärme an externe Dritte geliefert werden kann.

Der Aspekt der Effizienz bezieht sich hierbei nicht nur auf die klassischerweise betrachtete Energieeffizienz, sondern auch auf die Exergieeffizienz. Während die Energieeffizienz sich auf die Quantität der Wärme



Abbildung 3

Das 4-Stufen-Modell zur Dekarbonisierung industrieller Prozesswärme

(Grafik: IN4climate.NRW)

bezieht, beschreibt die Exergieeffizienz den effizienten Umgang mit der Qualität der Wärme. Der Exergiegehalt der Wärme ist abhängig vom Temperaturniveau (im Verhältnis zum Umgebungszustand). Zentrale Aufgabe ist es daher, wie in ► **Abbildung 2** angedeutet, für den jeweiligen Anwendungszweck temperaturangepasste Wärmeerzeugungslösungen einzusetzen. Niedertemperatur-Wärmequellen (NT) werden daher für Niedertemperaturanwendungen eingesetzt und dabei ggf. mit Unterstützung von Wärmepumpen auf ein geeignetes Temperaturniveau gebracht. Wertvolle Energieträger mit hohem Exergiegehalt wie Strom, Biomasse oder Gase sollten möglichst auf Hochtemperaturanwendungen (HT) bzw. auf den Einsatz in Wärmepumpen oder KWK-Anlagen beschränkt sein.

Die industrielle Abwärmenutzung ist ein zentraler Hebel zur Dekarbonisierung der Nah- und Fernwärme¹ und rückt zunehmend auch in den politischen Fokus hinsichtlich der Formulierung von Ausbauzielen und finanzieller Förderung². Hier müssen in den kommenden Jahren sowohl von Seiten der Industrieunternehmen als auch von Seiten der Energieversorger die gemeinsamen Anstrengungen zur Hebung der vorhandenen großen Potenziale erheblich verstärkt werden. Szenarienanalysen zeigen dabei, dass insbesondere in einem zukünftigen Klimaschutzpfad mit Fokus auf einer Direkt-Elektrifizierung bei der Industrie auch Auswirkungen auf die Abwärmenutzung zu erwarten sind. In ► **Tabelle 1** sind beispielhaft mögliche Wechselwirkungen zwischen der Industriedekarbonisierung und der industriellen Abwärmenutzung skizziert.

Stufe 2: Erneuerbare Wärme

Während die Eigenstromerzeugung mit Photovoltaik in den letzten Jahren eine große Dynamik entfaltet hat, ist die Erschließung lokaler erneuerbarer Wärmepotenziale wie Solarthermie und Geothermie für viele Unternehmen noch Neuland. Gerade mit Blick auf die durch den russischen Angriffskrieg hervor-

gerufene Energie- und Energiepreiskrise werden die zentralen Vorteile dieser Wärmequellen, nämlich ihre Unabhängigkeit von Energiepreisen und Energieimporten, deutlich.

Mit der Tiefengeothermie und der solaren Prozesswärme rücken mittlerweile zwei Technologien, die bisher eher in der städtischen Fernwärmeversorgung (z. B. im Raum München) bzw. im Sonnengürtel der Erde zum Einsatz kamen, verstärkt auch für die industrielle Anwendung in Mitteleuropa in den Fokus.

- **Tiefengeothermie**
Ein Papierhersteller in Hagen plant für seine Papiertrocknung eine der deutschlandweit ersten industriellen Tiefengeothermie-Anwendungen³. Hier soll geothermische Wärme aus ca. 3.000 bis 4.000 Meter Tiefe in der Grundlast perspektivisch ca. 40% des heutigen Erdgasbedarfes ersetzen und dadurch 30.000 Tonnen CO₂ einsparen (► **Abbildung 4**).
Die Roadmap Tiefe Geothermie für Deutschland schätzt das technische geothermische Potenzial für den industriellen Wärmebedarf (inkl. Raumwärme) grob auf 130 bis 150 TWh bzw. auf bis zu einem Viertel des industriellen Nutzwärmebedarfs ab [4, S. 17, 25].
- **Solarwärme für Industrieprozesse (nicht-konzentrierende und konzentrierende Solarthermie)**
Die solarthermische Wärmebereitstellung wurde in Deutschland bislang vor allem mit nicht konzentrierenden Kollektoren für die Brauchwassererwärmung oder Prozesswärme bis etwa 120°C eingesetzt. Dafür existieren etablierte Kollektortechnologien für unterschiedliche Zieltemperaturen, wobei Prozesswärmeanwendungen aufgrund der bislang sehr geringen fossilen Wärmekosten noch nicht sehr verbreitet sind. Einige wenige Anlagen existieren, in denen konzentrierende Kollektoren für die Erzeugung von Wärme oberhalb von 150°C eingesetzt

Tabelle 1
Mögliche Auswirkungen der Industriedekarbonisierung auf die Nutzung industrieller Abwärme
 (Quelle: Wuppertal Institut)

Indikator	Auswirkungen	Tendenz Abwärmepotenzial
1. Produktwechsel	<ul style="list-style-type: none"> Phase-out fossiler Produkte (z.B. Heizöl, Benzin) 	↓
2. Prozesswechsel	<ul style="list-style-type: none"> Phase-out abwärmeintensiver Prozesse (z.B. Ersatz Hochofenroute durch H₂-DRI) 	↓
3. Elektrifizierung	<ul style="list-style-type: none"> Erhebliche Effizienzverbesserung (bessere Dosierung, keine Abgase, Bsp.: elektr. Kalzinator) Erhöhter Bedarf an Flexibilisierung (Strom schlechter speicherbar als Brennstoffe), aber gleichzeitig auch Potenzial für Flexibilisierung (PtH mit Wärmespeicher) 	↘
4. PtX	<ul style="list-style-type: none"> Gewisse Effizienzverbesserung im Bereich der Energienachfrage (Synthese angepasster und sauberer Brennstoffe) Ansonsten tendenziell eher gleichbleibende Abwärmeströme hinsichtlich Menge und Temperatur Aber: bei H₂-Produktion (Elektrolyse) sowie Bereitstellung synthetischer Kohlenwasserstoffe (Methanol-Synthese, Fischer-Tropsch-Prozess) möglicherweise hohe zusätzliche Abwärmemengen 	↘ → ↑
5. iCCS/CCU-Route	<ul style="list-style-type: none"> Effizienzverluste (je nach Prozess höherer Dampf- oder Strombedarf) bzw. Nutzung (bisher ungenutzter) interner Abwärmeströme anstelle von Abwärmeabgabe an Dritte (z.B. Post-Combustion-CCS) Ansonsten etwa gleichbleibende Abwärmeströme hinsichtlich Menge und Temperatur 	↘ →

iCCS: industrielles Carbon Capture and Storage, CCU: Carbon Capture and Usage, DRI: Direct Reduced Iron

werden. Hintergrund war die landläufige Auffassung, dass konzentrierende Solarkollektoren nur in den sonnenreichen Regionen der Erde sinnvoll einzusetzen sind. Diese Sichtweise befindet sich aktuell im Umbruch, da in den letzten Jahren gezeigt werden konnte, dass der flächenspezifische Ertrag konzentrierender Kollektoren auch schon bei moderaten Betriebstemperaturen den von Flach- bzw. Vakuumröhrenkollektoren übersteigt, wie in [Abbildung 5](#) zu sehen ist. Da die spezifischen Kollektorkosten in größeren Solarfeldern in ähnlicher Höhe liegen, ist davon auszugehen, dass sich die Wirtschaftlichkeit konzentrierender Kollektoren gegenüber Flach- und Vakuumröhren-Kollektoren bereits ab einer mittleren Kollektortemperatur von ca. 80°C einstellt. Bei höheren Betriebstemperaturen ermöglicht die Konzentration erst die effiziente Energiebereitstellung.

Aktuell sind erste kommerzielle Anlagen in Mitteleuropa in Betrieb und weitere in Planung, bei denen Industriebetriebe mit Wärme bei bis zu 300°C mit konzentrierenden Kollektoren beliefert werden. Ein Beispiel ist eine 2,5 MW_{th}-Prozesswärmeanlage im belgischen Turnhout, die einen Temperaturhub von 260°C auf 300°C für den Industriekunden bereitstellt. Mit der ca. 5.000 m² großen Kollektorfläche werden so 430 Tonnen CO₂ pro Jahr eingespart. Die umfangreiche Zahl geplanter Projekte zeigt, dass sich für die konzentrierende Solarthermie ein kommerzieller Anwendungsfall auch im mitteleuro-

päischen Klima darstellen lässt. Entwicklungsthemen der nächsten Jahre werden neben der Kostensenkung vor allem der vollautomatische Betrieb und die Betriebsüberwachung sein.

Stufe 3: Elektrifizierung

Der Teil der Prozesswärme, der nicht durch rückgewonnene Wärme (Stufe 1) oder durch lokale erneuerbare Wärmepotenziale (Stufe 2) gedeckt werden kann, sollte möglichst elektrifiziert werden. Die direkte Elektrifizierung (= direkte Nutzung von erneuerbarem Strom zur Wärmeerzeugung) ist im Vergleich zur indirekten Elektrifizierung (= Power-to-Gas-to-Heat, d.h. Umwandlung von Strom in Gase und dann Verbrennung) mit deutlich weniger Wirkungsgradverlusten in der Erzeugungs- und Umwandlungskette verbunden ([vergl. Abbildung 6 in Stufe 4](#)).

Neben der eigentlichen **Elektrifizierung**, d.h. der Umstellung der technischen Wärmeerzeugungsverfahren sowie deren Energieträger von Brennstoffen (Gas, Öl, Kohle, Biomasse und abfallbasierte Brennstoffe) auf Strom, spielen zukünftig die **Flexibilisierung** und **Hybridisierung** eine zentrale Rolle, um flexibel auf Preisschwankungen vorrangig der Energieträger Strom und Gas reagieren zu können und um die Systemintegration fluktuierender erneuerbarer Stromquellen zu verbessern.

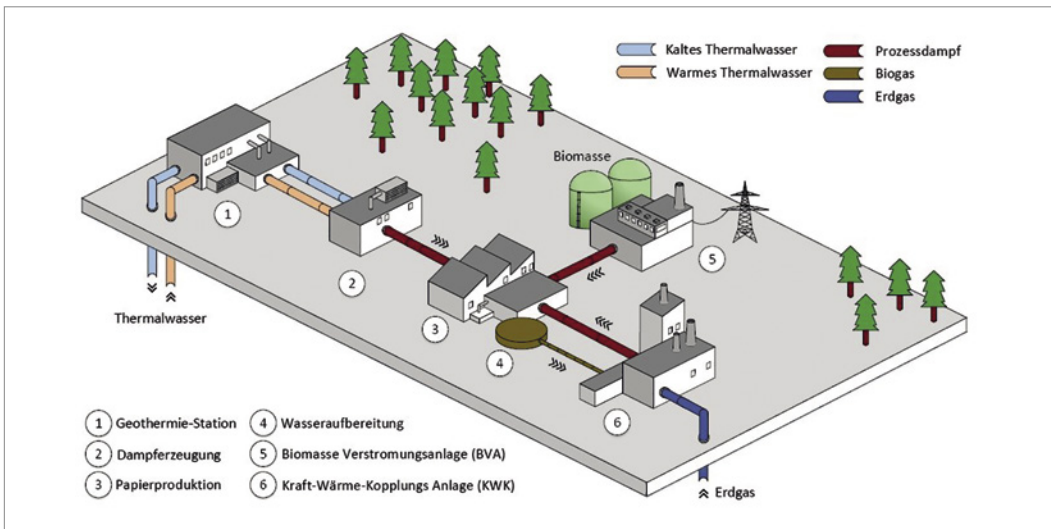


Abbildung 4
Hydrothermale Geothermie (23,5 MW_{th}) zur Papiertrocknung
 (Quelle: Kabel Premium Pulp & Paper, Grafik: Fraunhofer UMSICHT)

Als Flexibilisierung kann die Bereitstellung von thermischem oder elektrischem Lastverschiebungspotenzial durch Einsatz regelbarer Verbraucher, Erzeuger und/oder Speicher (thermisch, elektrisch, stofflich) verstanden werden.

Hybridisierung bedeutet die Erweiterung der Wärmeerzeugungskapazität durch parallele oder serielle technische Anlagen (Öfen, Brenner, Dampferzeuger, Heizstäbe...) oder aber ein Energieträgerwechsel bei gleichbleibender Kapazität (z. B. Fuel Switch von Öl oder Gas auf erneuerbare Wärme und Strom).

Als physikalisch-technische Elektrifizierungsverfahren für industrielle Wärmeprozesse stehen die Widerstandserwärmung, die induktive Hochfrequenz- und die konduktive Erwärmung (für metallische Leiter), die Dielektrische Hochfrequenzenerwärmung (Mikrowellenerwärmung für Nichtleiter wie Textilien, Holz oder Lebensmittel) sowie Infrarot-, Lichtbogen- und Plasma-Verfahren in jeweils unterschiedlichen Reifegraden (TRL-Level) zur Verfügung [5, S. 54 ff.].

Besondere Relevanz als Querschnittstechnologie

haben die Elektro- und Elektrodenkessel zur Erzeugung von Dampf bis ca. 240 °C bzw. bis ca. 500 °C mit elektrischem Dampfüberhitzer sowie die besonders effizienten Hochtemperatur-Wärmepumpen bis ca. 150 °C [6, S. 235]. Sie sind in der Lage, industrielle Niedertemperatur-Abwärme (ca. 20 bis 100 °C) aus Kühl- und Abwässern, Druckluftkompressoren oder Abluft aus Verbrennungseinrichtungen auf ein höheres, für die Dampferzeugung nutzbares Temperaturniveau zu heben. Durch eine anschließende Dampfkompensation können die Temperaturen bei Bedarf weiter erhöht werden.

Potenzielle Wärmesenken sind beispielsweise Verdampfungs- (40 ... 170 °C) und Trocknungsprozesse (40 ... 250 °C) sowie Verfahren wie Pasteurisieren und Sterilisieren (70 ... 120 °C) oder Destillieren (100 ... 300 °C). Für die Anwendung von HT-Wärmepumpen sind daher insbesondere die Branchen Nahrungsmittel, Chemie und Pharmazie, Papier, Maschinenbau, Textil, Metallerzeugnisse, Metalle und Mineralien geeignet. [7].

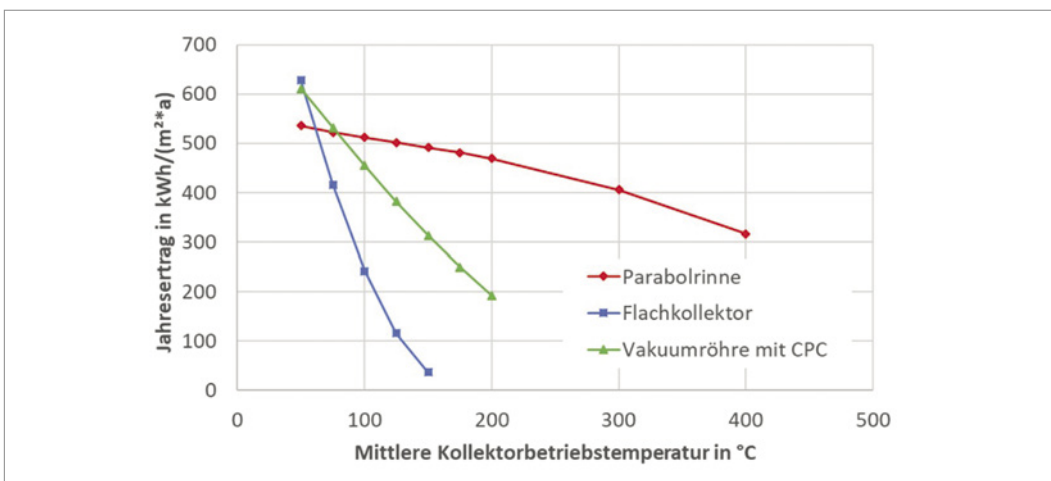


Abbildung 5
Solarthermie:
 Spezifische Erträge verschiedener Technologien (Standort Potsdam)
 (Grafik: D. Krüger et al., Quelle: DLR, Fraunhofer ISE)

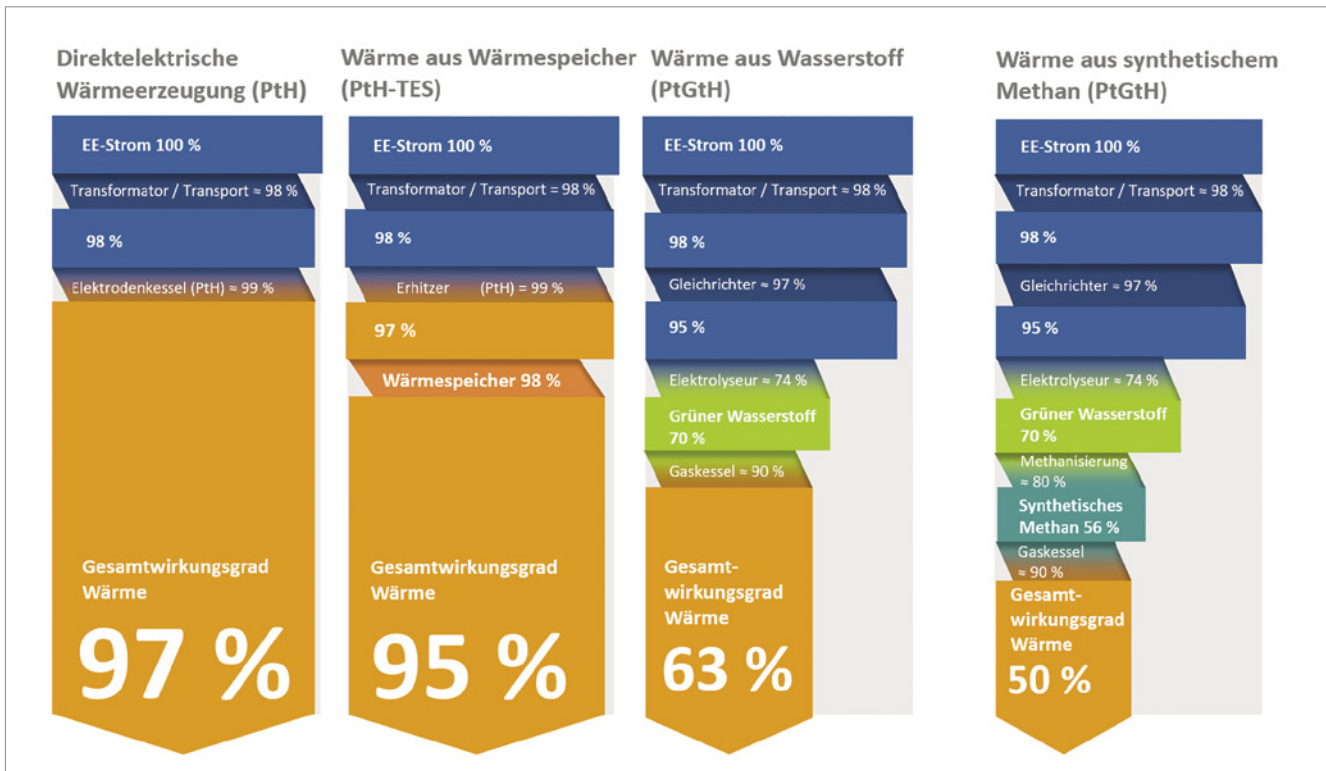


Abbildung 6

Vergleich von Wirkungsgradketten:

- **Power-to-Heat**

(mit und ohne Hochtemperaturspeicher)

- **Power-to-Gas**

(Wasserstoff und synthetisches Methan)

(Grafik: IN4climate.NRW mit eigenen Ergänzungen, Quelle: PtH-TES: DLR)

Bei der Elektrifizierung (Power-to-Heat – PtH) bietet sich die Kombination mit thermischen Energiespeichern an, die im nächsten Abschnitt vergleichend zu Power-to-Gas (PtG) diskutiert wird.

Stufe 4: Alternative Brennstoffe

Der Einsatz von alternativen Brennstoffen ist herausfordernd und sollte daher nach dem „Vier-Stufen-Modell“ als letzte Option betrachtet werden. Neben der energetischen Nutzung von Biomasse und Biogas im Bereich Prozesswärme gibt es weitere konkurrierende Nutzungsmöglichkeiten (z. B. stoffliche Nutzung im Bau oder in der Grundstoffchemie oder als Treibstoff im Flugverkehr) bei gleichzeitig begrenzter Verfügbarkeit nachhaltiger Biomasse.

Neben biogenen Brennstoffen steht die Erzeugung von grünem Wasserstoff im Fokus. Dieser kann auch in weitere chemische Energieträger wie Methan, Methanol oder Ammoniak umgewandelt werden, die zum Teil besser handhabbar, transportierbar oder speicherbar sind. Über die gesamte Erzeugungskette betrachtet, kommt es bei der energetischen Nutzung als Wärme bei diesen Trägern jedoch zu hohen Umwandlungsverlusten. Wie ► **Abbildung 6** zeigt, vervielfachen sich diese Verluste von 3 bis 5% bei PtH (mit/ohne TES) auf 37 bis 50% bei PtGtH (mit H₂ bzw. synthetischem Methan). Bei den vorgelagerten PtG-Wirkungsgradketten sind noch für den Fall Effizienzverbesserungen denkbar, wenn Abwärme z. B. aus der Elektrolyse sinnvoll genutzt werden kann.

Thermische (Hochtemperatur-) Energiespeicher (TES)

Solange erneuerbarer Strom nicht ganzjährig in ausreichenden Mengen zur Verfügung steht, sind aus ökologischer – und i. d. R. auch aus ökonomischer – Sicht die Vollastjahresstunden von PtH-Anlagen eingeschränkt. Neben der Option der Hybridisierung bzw. des Fuel-Switchs bieten sich hierbei thermische Energiespeicher (Thermal Energy Storage – TES) als Technologie an, da diese im Vergleich zu elektrischen Batterien typischerweise kostengünstiger sind. Die TES können bei hoher Verfügbarkeit von Wind- und PV-Strom beladen werden und bei Knappheit von erneuerbarem Strom Prozesswärme abgeben. Insgesamt erhöhen TES dadurch die Vollastjahresstunden zur Prozesswärmebereitstellung aus erneuerbarem Strom. Das heißt, dass TES die PtH-Route (Stufe 3) stärkt, da mehr volatiler erneuerbarer Strom in die Prozesse eingekoppelt werden kann.

Neben der Prozesswärme bieten Hochtemperatur-TES zusätzlich das Potenzial, bei der Entladung neben Wärme (über Dampfauskopplung) auch Strom netzdienlich bereitzustellen. Die Möglichkeit einer kombinierten Entladung von Strom- und Wärme (bzw. Dampf) wurde beispielhaft für einen Chemiestandort aufgezeigt [8].

Fazit

Klimaneutralität erfordert auch die Transformation industrieller Prozesswärme. Dieser Wandel ist aufgrund mannigfaltiger Anwendungen, Temperatur- und Druck-Niveaus, Medien, Prozesse etc. komplex und muss gesamtsystemisch – d. h. sektor-, stakeholder- und branchenübergreifend – angegangen werden. Das hier vorgestellte Vier-Stufen-Modell zur Dekarbonisierung industrieller Prozesswärme kann dabei eine gute Hilfestellung für die aus gesamtsystemischer Sicht optimale Priorisierung des Energieeinsatzes darstellen.

Bei der Entwicklung erneuerbarer Wärmepotenziale können die Tiefengeothermie und die Solarthermie für einige Branchen und Nieder- und Mitteltemperatur-Anwendungen wichtige Beiträge leisten. Hier sind individuelle, temperaturangepasste und ggf. auch hybride Lösungen aus Kombinationen verschiedener Technologien und eine frühzeitige Evaluierung möglicher lokaler Wärmequellen von zentraler Bedeutung.

Durch Sektorenkopplung (KWK, PtH und PtG) und Hybridisierung können aus der Industrie wichtige Beiträge zur Systemintegration von erneuerbarem Strom und zur Stabilisierung der Stromnetze geleistet werden.

(Hochtemperatur-)Wärmespeicher sind ein Schlüsselement, um erneuerbare Energiepotenziale besser auszuschöpfen, Systemkosten zu minimieren und Systemdienstleistungen zu erbringen.

Auch wenn viele der genannten Technologien schon marktreif oder marktnah zur Verfügung stehen, bedarf es zur weiteren Effizienzverbesserung und Kostensenkung noch Forschung und Entwicklung in diesen Bereichen:

- vollständige oder teilweise Elektrifizierung (inkl. HT-Wärmepumpen)
- Solarthermie (inkl. konzentrierender Systeme)
- Einsatz von grünem Wasserstoff, biogenen und anderen alternativen Brennstoffen
- (Hochtemperatur-)Wärmespeicher
- Systemintegration

Literatur:

- [1] IN4climate.NRW (Hrsg.), „Industriewärme klimaneutral: Strategien und Voraussetzungen für die Transformation. Ein Diskussionspapier der Arbeitsgruppe Wärme.“ Gelsenkirchen, Juni 2021. Zugriffen: 14. November 2022. [Online]. Verfügbar unter: www.energy4climate.nrw/fileadmin/Service/Publikationen/Ergebnisse_IN4climate.NRW/2021/diskussionspapier-klimaneutrale-waerme-industrie-cr-in4climatenrw.pdf
- [2] IN4climate.NRW (Hrsg.), „Prozesswärme für eine klimaneutrale Industrie. Impulspapier der Initiative IN4climate.NRW. Düsseldorf.“ Düsseldorf, Mai 2022. Zugriffen: 14. November 2022. [Online]. Verfügbar unter: www.energy4climate.nrw/fileadmin/Service/Publikationen/Ergebnisse_IN4climate.NRW/2022/prozesswaerme-fuer-eine-klimaneutrale-industrie-impulspapier-der-initiative-in4climatenrw-cr-nrwenergy4climate.pdf
- [3] AGFW (Hrsg.), „Leitfaden zur Erschließung von Abwärmequellen für die Fernwärmeversorgung“, AGFW | Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e. V., Frankfurt a. M., Leitfaden, Nov. 2020. Zugriffen: 14. November 2022. [Online]. Verfügbar unter: www.agfw.de/fileadmin/AGFW_News_Mediadateien/Energiewende_Politik/agfwleitfaden_ansicht_es.pdf
- [4] Fraunhofer IEG et al., „Roadmap Tiefe Geothermie für Deutschland - Handlungsempfehlungen für Politik, Wirtschaft und Wissenschaft für eine erfolgreiche Wärmewende“, Fraunhofer IEG, Bochum, Strategiepapier von sechs Einrichtungen der Fraunhofer-Gesellschaft und der Helmholtz-Gemeinschaft, Feb. 2022. Zugriffen: 14. November 2022. [Online]. Verfügbar unter: www.ieg.fraunhofer.de/content/dam/ieg/documents/Roadmap%20Tiefe%20Geothermie%20in%20Deutschland%20FhG%20HGF%2002022022.pdf
- [5] K. Görner und D. Lindenberger, „Virtuelles Institut ‚Strom zu Gas und Wärme‘, Band II Pfadanalysen: Flexibilisierungsoptionen im Strom-Gas-Wärme-System, Abschlussbericht des Hauptprojekts (2015–2017)“, GWI, EWI, Essen, Köln, Juli 2018. [Online]. Verfügbar unter: <http://strom-zu-gas-und-waerme.de/wp-content/uploads/2018/10/Virtuelles-Institut-SGW-Band-II-Pfadanalyse.pdf>

- [6] FZJ, GWI, RUB, WI, ZBT, „Virtuelles Institut Strom zu Gas und Wärme NRW: Abschlussbericht Kompetenzzentrum Virtuelles Institut – Strom zu Gas und Wärme, Band IV – Optimierung, Modellierung und Scale-up von PtX – Flexibilitätsoptionen“, Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie, Wuppertal, Abschlussbericht, März 2022. Zugriffen: 10. November 2022. [Online]. Verfügbar unter: http://strom-zu-gas-und-waerme.de/wp-content/uploads/2022/07/KoVI-SGW_Abschlussbericht-Band-IV-M%C3%A4rz-2022-final_V1.pdf
- [7] C. Arpagaus, „Wärmepumpen für die Industrie: Eine aktuelle Übersicht.“, gehalten auf der 25. Tagung des BFE-Forschungsprogramms „Wärmepumpen und Kälte“ 26. Juni 2019, BFH Burgdorf/CH, 26. Juni 2019. Zugriffen: 14. November 2022. [Online]. Verfügbar unter: www.ost.ch/fileadmin/dateiliste/3_forschung_dienstleistung/institute/ies/projekte/projekte_tes/91_sccer-eip/arpagaus_2019_wp_tagung_2019_burgdorf_waermepumpen_fuer_die_industrie_eine_aktuelle_uebersicht.pdf
- [8] T. Bauer u. a., „Ideal-Typical Utility Infrastructure at Chemical Sites – Definition, Operation and Defossilization“, Chem. Ing. Tech., Bd. 94, Nr. 6, S. 840–851, 2022, doi: 10.1002/cite.202100164.

Fußnoten

- 1 Zu deren Entwicklung siehe auch den Abwärme-Leitfaden der AGFW [3].
- 2 Siehe z. B. die Bundesförderung für effiziente Wärmenetze (BEW): www.bmwk.de/Redaktion/DE/Pressemitteilungen/2022/09/20220915-booster-fur-grune-fern-warme-bundesforderung-fur-effiziente-waermetetze-bew-startet.html oder die Bundesförderung für Energie- und Ressourceneffizienz in der Wirtschaft: www.bafa.de/DE/Energie/Energieeffizienz/Energieeffizienz_und_Prozesswaerme/energieeffizienz_und_prozesswaerme_node.html
- 3 Kabel ZERO-Projekt der Kabel Premium Pulp & Paper: www.kabelpaper.de/kabel-zero

Wärmepumpen machen Umweltwärme in Gebäuden nutzbar – der Schlüssel zu einer nachhaltigen Wärmeversorgung

Einleitung

Etwa 30% des Endenergiebedarfs in Deutschland entfallen auf Niedertemperaturwärmeanwendungen in Gebäuden (Heizung und Warmwasserbereitung) [1]. Bislang werden mit rund 19 Mio. Bestandsanlagen zur Nutzung von Erdgas und Heizöl über 90% fossile Wärmeerzeuger eingesetzt [2]. Mit dem Klimaschutzgesetz (vgl. §1 KSG) und dem Gebäudeenergiegesetz (vgl. §1 Abs.1 GEG) wurden rechtliche Rahmenbedingungen für eine Reduktion der Treibhausgasemissionen geschaffen. Weiterhin hat der Koalitionsausschuss beschlossen, dass ab dem 01.01.2024 alle neuen Heizungsanlagen mindestens zu 65% erneuerbare Energien einsetzen sollen, d.h. nicht nur im Neubau, sondern auch in Bestandsgebäuden, sobald ein Heizungstausch ansteht [3].

Wärmepumpen (WP) erschließen erneuerbare Wärme aus der Umgebung und machen diese für Anwendungen im Gebäude nutzbar. Im vorliegenden Beitrag werden ausschließlich elektrisch angetriebene Kompressionswärmepumpen betrachtet.

Arbeitsprinzip von Wärmepumpen

- Eine Wärmepumpe nimmt Umweltwärme bei niedriger Temperatur auf, indem ein Kältemittel bei geringem Druck verdampft wird.
- Der Dampf wird anschließend unter dem Einsatz elektrischer Energie verdichtet, wobei die Temperatur ansteigt.
- Durch Kondensation bei hohem Druck wird Wärme bei höherer Temperatur abgegeben.
- Nach der anschließenden Entspannung liegt das Kältemittel wieder im Ausgangszustand vor und kann den Prozess erneut durchlaufen.

Durch die Mobilisierung lokaler Umweltwärme können Wärmepumpen in typischen Anwendungen etwa drei- bis viermal so viel Heizwärme bereitstellen, wie sie elektrische Energie aufnehmen. Entsprechend stellen Wärmepumpen einen großen Hebel für die Wärmebereitung aus elektrischer Energie dar.

Szenarien zur künftigen deutschen Energieversorgung unter Berücksichtigung der Emissionsminderungsziele weisen der Wärmepumpe daher eine Schlüsselrolle zu [4, 5, 6]. 3,4–11 Mio. installierte Wärmepumpen bis 2030, bzw. 7,4–17 Mio. installierte Wärmepumpen bis 2045 oder 2050 werden jeweils als vorteilhaftester Transformationspfad zu einer CO₂-neutralen Wärmebereitung ermittelt. Beim WP-Gipfel der Bundesregierung am 10.08.2022 wurde daher das konkrete Ziel formuliert, die Zahl der pro Jahr installierten Heizungs-wärmepumpen schnell auf 500.000 zu steigern [7]. Für die benötigte, schnelle Transformation von fossiler Verbrennung zu elektrisch veredelter Umweltwärme müssen Wärmepumpen flächendeckend in Gebäuden im Neubau und Bestand zum Einsatz kommen.

Zwei Herausforderungen in diesem Kontext sind die nachhaltige Erschließung von Quellwärme und die Realisierung einer Betriebsführung mit Berücksichtigung der resultierenden Belastung des Stromnetzes. Der vorliegende Beitrag stellt Projektbeispiele aus verschiedenen Instituten des FVEE vor, die Lösungen aufzeigen und in der praktischen Umsetzung evaluieren.

Innovative Quellwärmesysteme und optimierte Nutzung lokaler Ressourcen

Im Projekt Solar-VHF (BMW FKZ 03ETW013) erforscht das Institut für Solarenergieforschung (ISFH) gemeinsam mit Partnern thermisch aktivierte, vorgehängte, hinterlüftete Fassadenelemente zur Gewinnung von Wärme aus der Gebäudehülle. Der Ansatz ermöglicht es, Quellwärme für die Wärmepumpe nahezu ohne Geräuschemissionen und ästhetisch ansprechend am Nutzungsort zu gewinnen. Besonders für die Sanierung von Bestandsgebäuden schafft die kombinierte Möglichkeit Wärmedämmung zu realisieren und Teilflächen der Fassade unsichtbar zu aktivieren attraktive Optionen. Im Projekt wurden Fassadenelemente aus unterschiedlichen Materialtypen (Beton, Metall und Glas,



ISFH
Fabian Hüsing
husing@isfh.de

Dr. Federico Giovannetti
f.giovannetti@isfh.de

CAE
Felix Klinker
felix.klinker@cae-zeroarbon.de

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

Fraunhofer ISE
Dr. Constanze Bongs

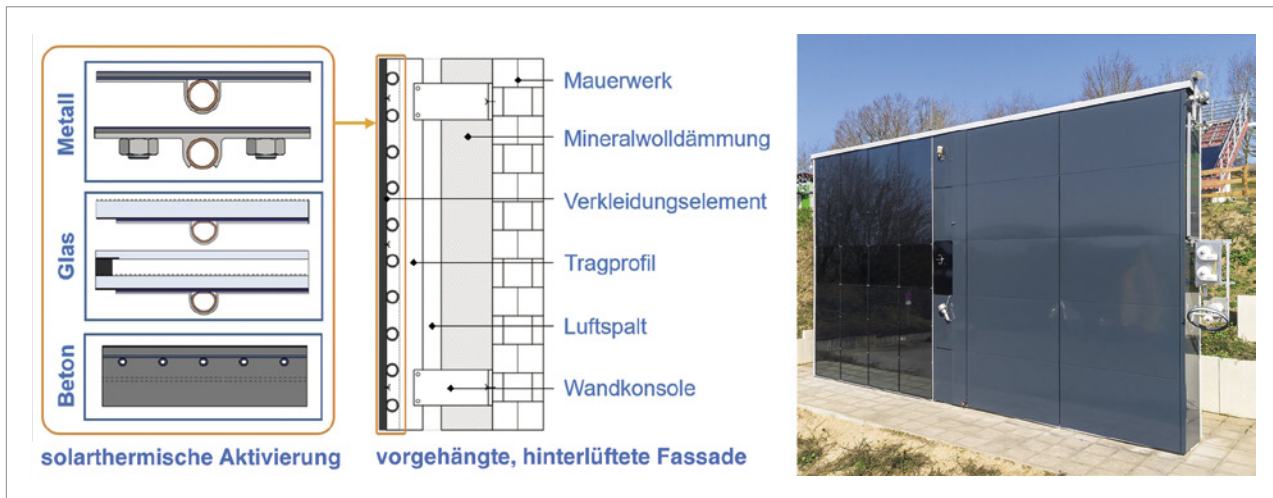


Abbildung 1 **Solar aktivierte hinterlüftete Fassade:**
 • links: Aufbau
 • rechts: Glas- und Metall-Fassadenelemente am Prüfstand des ISFH
 (Quelle: ©ISFH)

siehe ► **Abbildung 1**) in repräsentativen Betriebszuständen experimentell untersucht und charakterisiert. Auf Basis der Erkenntnisse werden in Simulationsstudien optimierte Systemkonfigurationen und Regelungsstrategien entwickelt, die in Demonstrationsobjekten umgesetzt werden sollen.

Es konnte gezeigt werden, dass bereits mittels der Aktivierung eines relativ kleinen Anteils von ca. 10% der opaken Fassadenfläche die Dimensionierung der Erdwärmequelle eines Mehrfamilienhauses mit 19 Wohneinheiten um 25% reduziert werden kann, bei gleicher Performance und höherer Robustheit der Wärmequelle (Stabilität der Quelltemperatur und somit auch Effizienz der WP im langjährigen Betrieb). Diese Reduktion ist signifikant, da sie eine Realisierung dieses effizienten erdreichgekoppelten Wärmepumpensystems auf der limitierten Grundstücksfläche erst möglich macht. Die Fassadenelemente generieren nutzbare Wärmeerträge von ca. 350 kWh/m²a, von denen ca. 30% direkt im Verdampfer der Wärmepumpe genutzt und die restlichen ca. 70% zur Regeneration der Erdwärmesonden eingesetzt werden. Bei einer höheren Fassadenbelegung könnte die Erdwärmequelle bis zu 50% kleiner dimensioniert werden, was die Relevanz der Lösung vor allem in urbanen Räumen noch verdeutlicht.

Aktuell wird ein Mehrfamilienhaus gebaut, in dem das im Vorhaben entwickelte System als Demonstrationsanlage mit einer Betonfassade umgesetzt wird, um mittels Monitoring die Funktion und Effizienz der Technologie im praktischen Einsatz nachzuweisen. In Simulationsstudien werden auch Möglichkeiten zur Nutzung der Fassadenelemente als alleinige Wärmequelle untersucht. Weitere Informationen siehe [8].

Der RENBuild-Systemansatz des ZAE (BMW FKZ 03EN1009) beinhaltet den Einsatz einer multivalenten, reversiblen Wärmepumpe und zeichnet sich dabei insbesondere durch seinen Systemgedanken aus, welcher sich in einer synergetischen Nutzung von Wärme-, Kälte- und Stromerzeugung widerspiegelt. Als Umweltenergiequelle für die Wärmepumpe kommt anstelle eines herkömmlichen Luftwärmetauschers ein photovoltaisch-thermischer Hybridkollektor (PVT-Kollektor) zum Einsatz, der auf seiner aktiven Fläche sowohl Wärme und Strom, als auch Kälte bereitstellen kann.

Ein großer Vorteil der PVT-Kollektoren gegenüber Luftwärmetauschern ist deren lautloser Betrieb sowie die Möglichkeit der Nutzung vorhandener Dach- oder Fassadenflächen. Immissionsschutz sowie fehlende Stellflächen für den Wärmetauscher stellen somit kein Hindernis für den Einsatz einer Wärmepumpe dar. Auch gegenüber Erdkollektoren bzw. Erdsonden bieten sich Vorteile im Hinblick auf Planungsaufwand und Platzbedarf.

Die genannten Punkte machen den im Projekt verfolgten Ansatz grundsätzlich auch für den dicht bebauten städtischen Bereich bzw. unter gewissen Voraussetzungen für Nachrüstungen im Gebäudebestand interessant, wo weder Erdsonden realisiert werden können, noch geeignete Stellflächen für Luftwärmetauscher zur Verfügung stehen.

Um vorhandene Umweltenergie möglichst effizient zu nutzen, werden im RENBuild-System Latentwärmespeicher, sog. PCM-Hybrid-Speicher mit hoher Speicherdichte (etwa Faktor 3 ggü. Wasser), vorgesehen. Diese speichern zu günstigen Zeiten erzeugte Wärme oder Kälte für die spätere Nutzung zwischen. Die Speicherbeladung kann prinzipiell sowohl rein passiv über die PVT-Kollektoren als auch wärmepumpenunterstützt erfolgen, wobei die Wärme-

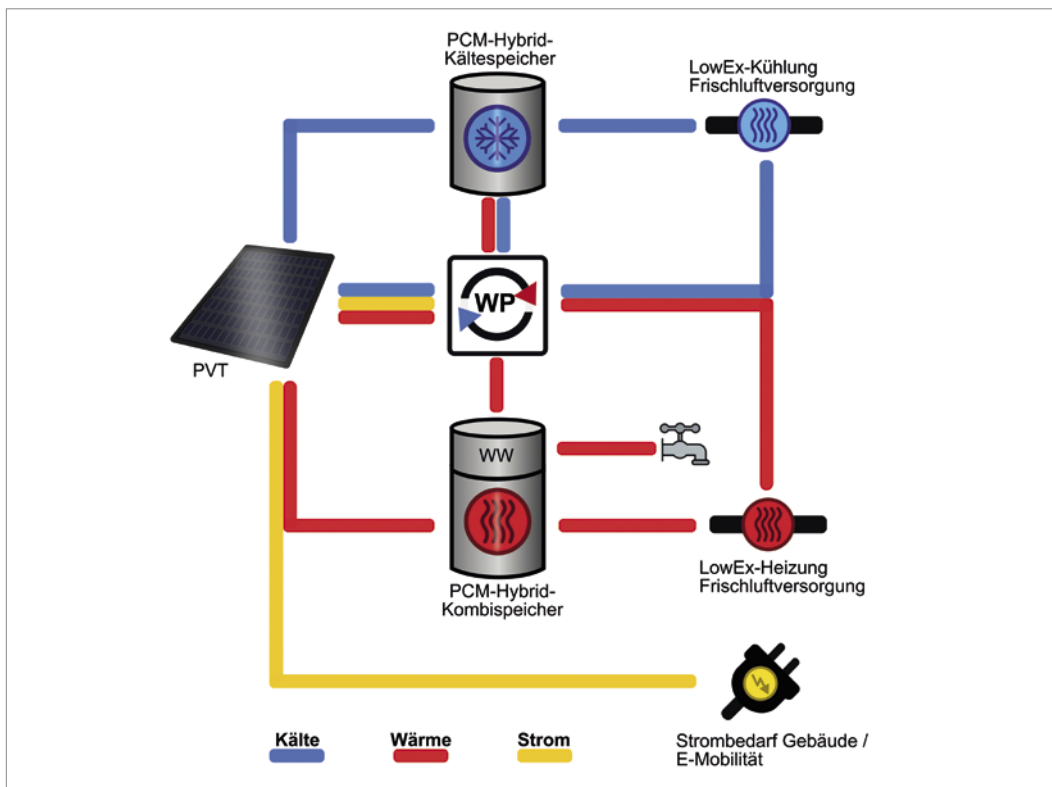


Abbildung 2

**RENBuild
Systemansatz:**

Schema
mit wesentlichen
Komponenten und
Energeströmen

(Quelle: © ZAE)

pumpe vorrangig mit dem zeitgleich erzeugten PV-Strom betrieben werden soll. Perspektivisch ermöglicht die Einbindung dieser Speicher mit hoher Kapazität aber auch netzdienliche Betriebsweisen über Power2Heat bzw. Power2Cold immer dann, wenn es beispielsweise ein Überangebot an Strom im öffentlichen Netz gibt.

Synergieeffekte im System ergeben sich, wenn die Wärmepumpe nutzbare Wärme und Kälte gleichzeitig erzeugt. Dies ist beispielsweise der Fall, wenn die Wärmepumpe quellenseitig die Wärme nicht mittels PVT-Kollektoren der Umgebung, sondern dem Kältespeicher entzieht, z.B. um das Gebäude zu kühlen und den Warmwasser-Speicher zu laden. Ein Schema des RENBuild-Systemansatzes mit den wesentlichen Komponenten und den möglichen Energieströmen zeigt ► [Abbildung 2](#).

Der RENBuild-Systemansatz wurde im Projekt sowohl auf Basis detaillierter Simulationen untersucht, als auch in einer Experimentalanlage erprobt. Die Simulationen für ein Einfamilienhaus ergaben unter Berücksichtigung der Eigenstromnutzung Systemjahresarbeitszahlen von 5,2 ohne und 6,6 mit einem 7,5-kWh-Batteriespeicher. Aktuell wird das System in zwei Demonstrationsvorhaben umgesetzt: einem Wohn- und einem Bürogebäude (► [Abbildung 3](#)). Beide Gebäude durchlaufen eine Monitoringphase im Jahr 2023. Weitere Informationen siehe [9].

Das Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme (ISE) entwickelte in Zusammenarbeit mit der Uni Freiburg - Institut für Nachhaltige Energiesysteme (Inatech) und den Umsetzungspartnern Volkswohnung und den Stadtwerken Karlsruhe ein intelligentes Quartiersenergiesystem, das in Karlsruhe Durlach Wärmepumpen, PV-Module und Blockheizkraftwerke verbindet (BMW FKZ 03ET1590B).

Das Quartier besteht aus fünf zu versorgenden teil-sanisierten Mehrfamiliengebäuden aus den 1960er Jahren. Das integrierte Quartiersenergiesystem wurde im Jahr 2021 installiert und seitdem sukzessive in Betrieb genommen. An allen fünf Gebäuden sind PV-Module mit einer Gesamtleistung von 194 kWp installiert. Die Ergebnisse der simulationsbasierten Optimierung deuten darauf hin, dass große PV-Kapazitäten sowohl unter wirtschaftlichen als auch unter Energieeffizienzgesichtspunkten von Vorteil sind. Aufgrund gesetzlicher Vorschriften ist die installierte Leistung jedoch auf 100 kWp pro Jahr begrenzt. Die PV-Anlagen werden daher in zwei Stufen installiert.

Zwei dezentrale Wärmepumpensysteme mit einer thermischen Leistung von 43 kWth und 71 kWth versorgen zwei Gebäude mit Wärme. Die Wärmepumpen verwenden innovative Niedertemperaturquellen, die sich speziell mit der Herausforderung der begrenzten Verfügbarkeit von Umgebungswärme-

Abbildung 3

RENBuild-System:
Demonstration in
einem Einfamilienhaus

(Quelle: ©Hanse Haus
GmbH & Co. KG)



quellen in städtischen Gebieten befassen. Das erste Wärmepumpensystem mit 43 kWth thermischer Leistung ist mit hybriden Photovoltaik-/thermischen PVT-Kollektoren mit einer Gesamtkollektorfläche von 202 m² gekoppelt. Als alleinige Quelle der Wärmepumpe werden PVT-Kollektoren mit verbesserter Wärmeübertragung aus der Umgebung durch einen rückseitigen Lamellenwärmetauscher verwendet. Das zweite Wärmepumpensystem mit einer thermischen Leistung von 71 kWth nutzt ein Mehrquellensystem mit intelligenter Steuerung und Hydraulik. Durch die Quellenkombination aus Erdwärme und Außenluft wird nur 50% der Größe eines herkömmlichen Erdsondenfelds benötigt.

Drei weitere Gebäude sind an ein Nahwärmenetz angeschlossen, das von zwei mit Erdgas betriebenen Blockheizkraftwerken (BHKW) mit einer Leistung von jeweils 50 kWel/92 kWth betrieben wird. Messergebnisse aus der ersten Heizperiode konnten bisher für einzelne Monate ausgewertet werden. Das Mehrquellen-Wärmepumpensystem erreichte eine Arbeitszahl von 3,1 (bilanzierter Zeitraum: 19.2.-7.3.2022 / Übergangszeit), nachdem die Heizkurve abgesenkt und ein Spitzenlast-Mischventil optimiert wurde. Auf Quartiersebene wurde im Januar 2022 ein hohes Maß an elektrischer Autarkie (88%) und Selbstversorgung (81%) erreicht und der Strom für die Wärmepumpen vollständig von den KWK- und PV-Anlagen geliefert. Weitere Informationen siehe [10].

Im Projekt OptDienE – Optionen zum netzdienlichen Betrieb von Einzelraumfeuerstätten (BMWK FKZ 03KB138) hat das DBFZ zusammen mit dem ISFH untersucht, wie der Einsatz von bestehenden Einzelraumfeuerstätten für Holz zu einer Absenkung der durch Wärmepumpen verursachten Stromlast

beitragen kann. Wesentliche Motivation ist, dass Luft/Wasser-Wärmepumpen absehbar auch weiterhin den größten Marktanteil in Bestandsgebäuden erreichen werden, da sie keine großen Veränderungen am Grundstück oder tiefe Bohrungen inkl. der Genehmigungsfragestellungen erfordern.

Luft/Wasser-Wärmepumpen weisen jedoch im Winter, wenn der höchste Heizbedarf vorliegt, einen wesentlichen Nachteil auf: Die kalte Außentemperatur der Wärmequelle verringert die Leistungszahl, so dass insbesondere in den Zeiten mit geringer PV- und teilweise auch Windenergiebereitstellung besonders hohe Stromnachfragen entstehen, die das Stromnetz bei einem massiven Ausbau der Anlagenzahlen stark belasten kann.

Daher wird vielfach davon ausgegangen, dass für Bestandsgebäude mit Präferenz zur Luft/Wasser-Wärmepumpe entweder zunächst eine kostenintensive energetische Vollsanierung des Gebäudes oder die Wahl eines anderen erneuerbaren Heizsystems (z. B. eine alleinige Pelletfeuerung) vorzusehen ist. Letzteres ist aber bei der Größe des Altbaubestands mit Radiatorenheizungen und der sehr schleichenden Gebäudesanierung aufgrund begrenzter nachhaltiger Biomassepotenziale im notwendigen Umfang nicht realisierbar. Dieser Engpass wird verstärkt durch eine wachsende Nachfrage an Biomasse für die Bereitstellung von Hochtemperatur-Prozessenergie.

Eine vielversprechende Lösung können Wärmepumpen-Biomasse-Hybride sein. Hierbei deckt die Biomassefeuerung nur die 20–25% des Energiebedarfs, die eine Luft-Wasser-Wärmepumpe nicht effizient bereitstellen kann. Auf diese Weise wird die Wärmewende für alle Gebäude schon heute möglich.

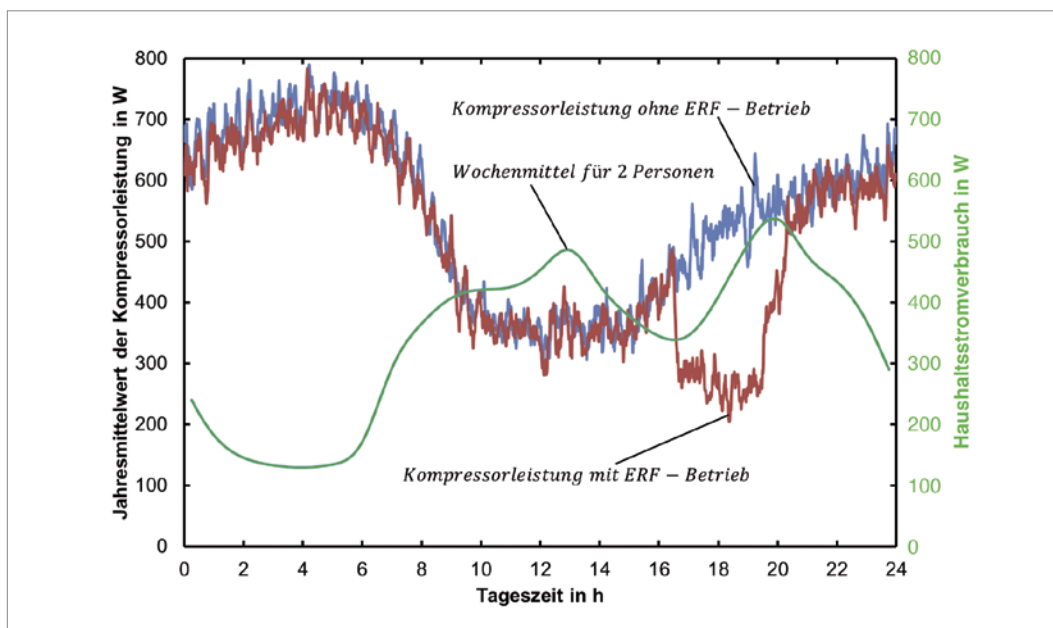


Abbildung 4
Minderung des mittleren elektrischen Leistungsbedarfs der Wärmepumpe durch gezielte Nutzung einer Einzelraumfeuerung (ERF)
 (Quelle: ©ISFH)

Im Projekt OptDienE hat sich gezeigt, dass je nach Einsatzzeit marktüblicher Einzelraumfeuerstätten signifikante Minderungen des Leistungsbedarfs der Wärmepumpe im Schnitt über das Jahr um bis zu 50% während der Ofenbetriebszeit möglich sind (► *Abbildung 4*). Im Hinblick auf die Vermeidung von Stromlastspitzen im Netz ist eine Flexibilisierung der Einsatzzeiten abhängig vom Netzbedarf anzustreben. Hierzu bedarf es vor allem klarer Preissignale, die auch bei den Endkund*innen ankommen, sowie Geräten mit großen Beiträgen ins zentrale Heizungssystem mit hoher Betriebsflexibilität, d. h. entweder einem passend dimensionierten Pufferspeicher oder einer automatisierten Feuerung mit automatischer Brennstoffzufuhr und automatischer Zündung. Pellet- und Holzhackschnitzel-Kessel und -öfen weisen hier große Vorteile auf. Stückholzfeuerungen brauchen einen ausreichend großen Pufferspeicher und automatisierte Rückmeldesysteme an die Betreiber*innen.

Im Vorhaben GeoResume des ISFH (FKZ: 03EE4021A) wird der nachhaltige und leistungsoptimierte Betrieb von Erdwärmesondenfeldern durch zweckmäßige Betriebsüberwachung und thermische Regeneration erforscht. Durch detailliertes Monitoring mehrerer Anlagen in Norddeutschland werden Erkenntnisse zum realen Betriebsverhalten großer Erdwärmesondenfelder ermittelt und so die Grundlage für validierte Simulationsmodelle geschaffen.

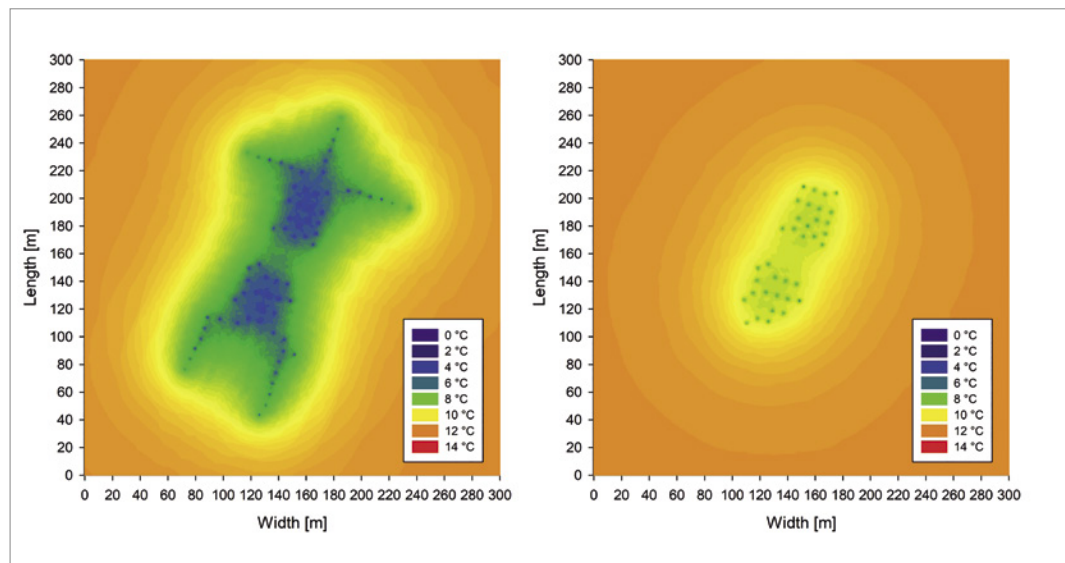
In Simulationsstudien werden optimierte Konzepte zum nachhaltigen Betrieb durch Regeneration mit Solar-, Umwelt- und Abwärme anhand von Fallbeispielen entwickelt.

Ein Beispiel ist die Versorgung eines Neubaugebiets in Hannover, das sich eine hohe Eigenversorgungsquote mit erneuerbaren Energien zum Ziel gesetzt hat. Dafür waren eine Belegung der Dachflächen mit Photovoltaik (PV) und die Installation dezentraler Wärmepumpen mit zentraler Quellwärmegewinnung mittels Erdwärmesondenfeld und Quellwärmenetz vorgesehen. Da maximal 70 Erdwärmesonden (EWS) auf dem Gelände erschlossen werden können, wurde eine Regeneration mittels PVT-Kollektoren untersucht, welche anteilig PV-Module ersetzen. Die Eigenschaften dieser bivalenten Quelle werden nachfolgend an zwei Dimensionierungsbeispielen diskutiert.

Mit 80 m² PVT-Kollektorfläche und 70 EWS kann die Quellwärme unter Einhaltung der minimal zulässigen Eintrittstemperaturen auf dem Grundstück erschlossen werden. Bei Realisierung von 700 m² PVT-Kollektorfläche reichen 35 EWS für die Wärmequelle aus. Während im ersten Fall (70 EWS) nach 50 Jahren eine deutliche Auskühlung des Erdreichs auftritt, liefert die zweite Dimensionierung (35 EWS) stabile Temperaturen (► *Abbildung 5*), die sich in kontinuierlich hoher Wärmepumpeneffizienz widerspiegeln.

Simulationsergebnisse aus EED und TRNSYS verdeutlichen, dass Erdwärmesondenfelder besonders stark von thermischer Regeneration profitieren. Nachhaltiger Betrieb wird auch bei kleineren Sondenabständen möglich und somit der Flächenbedarf für die Erschließung der Wärmequelle wesentlich reduziert. Die Kombination hoher thermischer Leistung (Solarthermie) und hoher thermischer Kapazität (EWS) ergibt eine robuste multivalente Wärmequelle, insbesondere für hohe flächenspezifische Wärme-

Abbildung 5
Erdwärmesondenfeld:
 Temperaturverteilung
 im Erdreich in
 75 m Tiefe nach
 50 Jahren Betrieb
 links: 70 EWS
 mit 80 m² PVT
 rechts: 35 EWS
 mit 700 m²
 (Quelle: © ISFH)



bedarfe. Im Projekt werden verallgemeinerbare wirtschaftlich technische Bewertungsmethoden als Entscheidungshilfe für multivalente Wärmequellen erarbeitet. Weitere Informationen siehe [11].

Fazit

Die Ergebnisse der vorgestellten Vorhaben machen deutlich, dass eine Vielzahl an Technologiebausteinen durch intelligente Kombination und Betriebsführung die nachhaltige Wärmeversorgung mittels Wärmepumpen in unterschiedlichen Gebäuden ermöglicht. Von zentraler Bedeutung sind dabei jeweils die Analyse der lokalen Bedarfe und die zielgerichtete Erschließung vorhandener Potenziale. Einige Technologien und Systemkonzepte haben schon einen hohen technologischen Reifegrad erreicht. Durch die Umsetzung und Betriebsanalyse innerhalb der Projekte ist sichergestellt, dass die Erkenntnisse schnell in die praktische Anwendung überführt werden können.

Danksagung

Die vorgestellten Erkenntnisse basieren jeweils auf der konstruktiven Zusammenarbeit mit Partnern aus Wissenschaft, Industrie, Planung und Umsetzung. Die Projekte werden bzw. wurden aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestags vom Bundesministerium für Wirtschaft, Klimaschutz und Energie gefördert. Die Autor*innen danken für die Unterstützung Ihrer Arbeit. Die Inhalte des Beitrags liegen in der alleinigen Verantwortung der Autor*innen.

Literatur

- [1] <https://www.umweltbundesamt.de/daten/energie/energieverbrauch-fuer-fossile-erneuerbare-waerme#warmeverbrauch-und-erzeugung-nach-sektoren>, abgerufen am 15.09.2022
- [2] https://www.bdh-industrie.de/fileadmin/user_upload/Pressegrafiken/Diagramm_Gesamtzahl_Waermeerzeuger_2021_DE.jpg, abgerufen am 15.09.2022
- [3] https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/Energie/65-prozent-erneuerbare-energien-beim-einbau-von-neuen-heizungen-ab-2024.pdf?__blob=publicationFile&v=6, abgerufen am 15.09.2022
- [4] Ausfelder F., Drake F.-D., Erlach B., Fishedick M., Henning H.-M., Kost C., Münch W., Pittel K., Rehtanz C., Sauer J., Schätzler K., Stephanos C., Themann M., Umbach E., Wagemann K., Wagner H.-J., Wagner U.: »Sektorkopplung« – Untersuchungen und Überlegungen zur Entwicklung eines integrierten Energiesystems (Schriftenreihe Energiesysteme der Zukunft), München 2017, S. 122
- [5] Gebert P., Herhold P., Burchard J., Schönberger S., Rechenmacher F., Kirchner A., Kemmler A. und Wünsch M. 2018. Klimapfade für Deutschland – Study by Boston Consulting Group and Prognos on behalf of the Bundesverband der Deutschen Industrie (BDI) e. V., Berlin, S. 220f
- [6] Bründlinger T., König J. E., Frank O., Gründig D., Jugel C., Kraft P., Krieger O., Mischinger S., Prein P., Seidl H., Siegemund S., Stolte C., Teichmann M., Willke J., Wolke M. 2018. dena-Leitstudie Integrierte Energiewende – Ergebnisbericht und Handlungsempfehlungen, Herausgeber: Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena), Berlin, S. 150
- [7] <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/A/absichtserklaerung-waerme-pumpen.html>, abgerufen am 15.09.2022
- [8] Büttner C., Frick E. und Giovannetti F. (2022): Solar-Thermal Activation of Rear-Ventilated Façades as a Source for Heat Pump Based Heat Supply Systems, Proceedings of EuroSun 2022, Kassel, Germany, 28.09.2022
- [9] <https://ewb.innoecos.com/Group/03EN1009verbund/Informationen>
- [10] Lämmle M., Kropp M., Metz J. und Herkel S. (2022): SIMULATION AND MEASUREMENT RESULTS OF A SMART DISTRICT WITH CONNECTED HEAT PUMPS, PV AND CHP AS A MODEL PROJECT FOR DECARBONIZING EXISTING MULTIFAMILY BUILDINGS, Proceedings of BauSIM 2022, Weimar, Germany, 20.–22.09.2022
- [11] Weiland F., Kracht N., Chhugani B. Pärtsch P. (2022): Techno-Economical Assessment of a Solar Regenerated Borehole Heat Exchanger Field with PVT Collectors for District Heating, Proceedings of EuroSun 2022, Kassel, Germany, 26.09.2022

Rolle thermischer Speicher im zukünftigen Energiesystem



ZAE
Dr. Stefanie Tafelmeier
stefanie.tafelmeier@zae-bayern.de

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

Fraunhofer ISE
Stefan Gschwander
stefan.gschwander@ise.fraunhofer.de

Thermische Energiespeichertechnologien

Die Motivation für eine nachhaltige Energieversorgung ist so groß wie noch nie. Neben dem Klimaschutzgesetz der Bundesrepublik, rückt mit der Reduktion der Gasversorgung die Notwendigkeit alternativer Energieversorgung weiter in den Vordergrund. Der zu deckende Energiebedarf in Deutschland beläuft sich auf etwa 2.300 TWh im Jahr [1], welche für über 700 Mio. Tonnen Kohlendioxid-(CO₂)-Emissionen jährlich verantwortlich sind. Diese CO₂-Emissionen lassen sich den Verbrauchssektoren zuordnen, darunter den privaten Haushalten (> 21 %), der Industrie (> 32%), dem Transport (> 24%) sowie Handel und Gewerbe (> 15%). Der Energieverbrauch entfällt dabei zu ca. 24 % auf elektrische Anwendungen, zu 24 % auf Mobilitätsanwendungen und zu mehr als 50 % auf thermische Anwendungen für die Bereitstellung von Wärme und Kälte [2].

Bedarf und Angebot sind nicht immer zeitgleich und lokal miteinander gekoppelt. Ein Ausgleich kann durch Speicherung gelingen. In verschiedenen Anwendungsbereichen können Energiespeicher systemdienlich und zur Gewährleistung der Versorgungssicherheit eingesetzt werden und sowohl die Integration von erneuerbaren Energien als auch die Steigerung der Energieeffizienz optimieren. Während der Ausbau elektrochemischer Speicher in den letzten Jahren Fahrt aufgenommen hat [3], bleiben thermische Energiespeicher wie die Wärmewende als Ganzes noch deutlich hinter ihren technischen Möglichkeiten zurück.

Bei einer steigenden Wärmebereitstellung aus erneuerbaren Energien sind ein steigender Flexibilisierungsbedarf und damit eine steigende Bedeutung für Wärmespeicher zu erwarten [4], etwa auf der Sektorgrenze Strom-Wärme. Entsprechend werden jetzt die Aktivitäten in diesem Forschungsbereich verstärkt.

Es werden diese thermischen Speichertechnologien unterschieden: sensible Energiespeicher, Latentwärmespeicher und thermochemische/sorptive Speicher (► *Abbildung 1*).

Sensible Wärmespeicher nutzen die sensible (fühlbare) Wärmespeicherkapazität von Materialien. Ausführungen wie der Warmwasserspeicher sind lange erprobt, robust und kostengünstig. Allerdings ist die spezifische Speicherkapazität, also die Kapazität Wärme bzw. Kälte pro Volumen oder Masse zu speichern, niedrig. Neben Wasser als Speichermedium, werden auch Feststoffe oder Flüssigsalze verwendet, die das Potenzial haben, Hochtemperaturwärme zu speichern.

Latentwärmespeicher hingegen nutzen den Phasenwechsel eines Materials und die dabei umgesetzte latente Wärme. Phasenwechsel bedeutet den Übergang eines Materials, zum Beispiel von fest nach flüssig. Den Effekt des Phasenwechsels zu nutzen bringt mehrere Vorteile: Das Material hat eine hohe Energiespeicherdichte im Temperaturbereich des Phasenwechsels und die Wärme/Kälte-Übertragung findet bei konstanter Temperatur statt. Auch hier ist Wasser in Form eines Eisspeichers ein bekanntes Anwendungsbeispiel. Bei 0 °C Phasenwechseltemperatur ist eine theoretisch 12-mal höhere Speicherkapazität möglich im Vergleich zu einem sensiblen Kalt-Wasserspeicher gleicher Masse mit einer Temperaturspreizung von 6 °C bis 12 °C.

Eine Vielzahl von organischen und anorganischen Stoffen in Form von Reinstoffen oder Mischungen decken einen weiten Temperaturbereich ab.

Auf Grund der relativ geringen Wärmeleitfähigkeit haben Latentwärmespeicher eine niedrige Entladeleistung. Eine passive Temperaturkontrolle ist damit gut umsetzbar, aktive Wärmebereitstellung verlangt jedoch nach einem guten Speicherkomponentendesign.

Thermochemische Speicher nutzen entweder die Reaktionsenthalpie von chemischen Reaktionen oder die von Absorptions- bzw. Adsorptionsreaktionen, dann werden sie auch sorptive Speicher genannt.

Beispiele sind die Hydratation von Kalk $\text{CaO} + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{Ca(OH)}_2$ oder die Adsorption von Wasserdampf an Zeolith. Damit lassen sich hohe Energiespeicherdichten erzielen, die deutlich über denen der

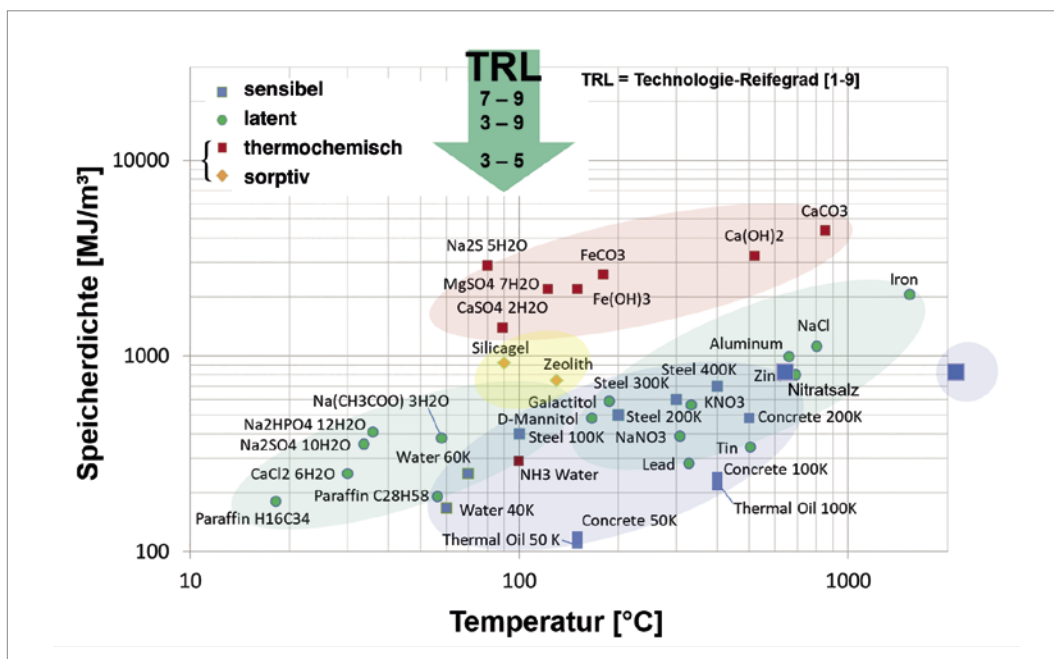


Abbildung 1
Energiespeicherdichte unterschiedlicher thermischer Speichermedien.
 Die Energiespeicherdichte ist abhängig vom Temperaturbereich, in dem die Medien angewendet werden.
 (Quelle: angelehnt an Diagrammquelle Fraunhofer ISE)

vorgenannten Speicher liegen, insbesondere wenn ein Teil der Energie beim Laden an die Umgebung oder einen anderen Prozess abgegeben wird und beim Entladen von dort wieder bezogen wird. Der Speicherprozess wirkt dabei als Wärmepumpe. Wenn die Umgebungsbedingungen passen, können gute Wirkungsgrade und Entladetemperaturen erreicht werden, die über den Ladetemperaturen liegen. Die Speicherdauer hat kaum Einfluss auf den Wirkungsgrad.

Wirtschaftlich attraktiv sind diese Speicher dann, wenn sie optimal in eine vorhandene Prozessumgebung eingebunden werden können.

Beitrag thermischer Speicher zur Integration erneuerbarer Energien und Energieeinsparung

Energie-Unabhängigkeit kann zum einen durch den Beitrag (lokaler) erneuerbarer Energieerzeuger erreicht werden, aber auch durch eine Reduktion des Energiebedarfs in Folge erhöhter Energie-Effizienz. Der steigende Anteil erneuerbarer Energien mit unterschiedlichem Verfügbarkeitsbild bringt die

Herausforderung einer optimalen Integration von sowohl elektrischer als auch thermischer Energie mit sich. Mit den oben beschriebenen Eigenschaften der Speichermaterialien ist für Letztere eine Anwendung von thermischen Energiespeichern naheliegend. Für die Steigerung der Energie-Effizienz bieten thermische Speicher jedoch ein ebenso breites Anwendungsfeld. Neben dem Einsatz in industriellen Prozessen, in denen Abwärme weiter nutzbar gemacht wird, können thermische Speicher die Klimatisierung sowohl in Gebäuden als auch für Transportmittel effizienter gestalten. Der Temperaturbereich ist dabei ein entscheidender Faktor bei der Materialwahl. Benötigte Speicherdauer, -Kapazität und Leistungsabgabe bestimmen zudem die Speicher-ausführung (► *Abbildung 2*).

Die Energiespeicherkonfiguration in Anwendungen lässt sich vereinfacht in das Energieangebot (Angebot), den thermischen Energiespeicher (TES) und den Energieverbraucher (Bedarf) unterteilen. Das Angebot kann beispielsweise elektrische Leistung sein oder als Abwärme/-Kälte von industriellen Prozessen vorliegen. Solarthermische Wärmequellen

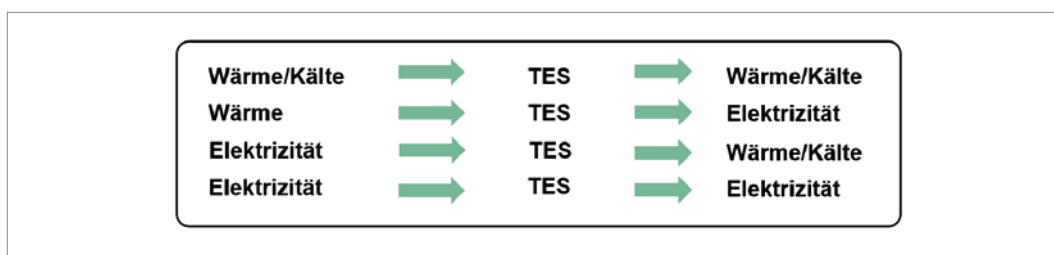


Abbildung 2
Thermische Energiespeicher-Konfiguration

Abbildung 3
**Testanlage für
 thermische Energie-
 speicherung mit
 Flüssigsalz**
 (Quelle: DLR, Projekt TESIS)



sind ebenso denkbar. Der Bedarf kann ebenso elektrischer als auch thermischer Natur sein. Um den Gedanken näher zu bringen, sind im Folgenden vier Beispiele für je eine Anwendungskonfiguration nach dem Muster „Angebot - TES - Bedarf“ dargestellt:

- Wärme – TES – Elektrizität:
 Konzentrierende Solarthermie Anlagen mit sensiblen Flüssigsalzspeicher (► *Abbildung 3*) speichern Wärme, die bei Bedarf an einen Wasserdampf-Kreislauf übertragen wird. Über Dampfturbinen wird so elektrische Energie bereitgestellt.
- Elektrizität – TES – Kälte:
 Lastverschiebung durch kleine Latentwärmespeicher in Kühl-/Gefrierkombination werden bei Überschussstrom geladen und entladen, wenn ein Mangel an Energie vorliegt [5].
- Elektrizität – TES – Elektrizität:
 Diese Energiespeicherkonfiguration wird auch Carnot-Batterie genannt. Das Überangebot an elektrischer Energie wird in Form von Wärme zum Beispiel mit Hilfe eines sensiblen Flüssigsalz- oder Feststoffspeichers gespeichert. Die Wärme des Speichers ist ausreichend, um ein Medium zu verdampfen und über eine Turbine wieder elektrischen Strom zu erzeugen.
- Wärme – TES – Wärme:
 Abwärmennutzung eines Schmelzofens einer Gießerei durch Laden eines sensiblen Speichers aus Feststoffschüttung und Thermo-Öl. Die gespeicherte Wärme dient der Bereitstellung von Prozess- und Heizwärme sowie Prozesskälte [6].

Diese Beispiele zeigen konkrete Umsetzungen von thermischen Energiespeicherkonfigurationen. Die Vielfalt der Anwendungen mit ihren unterschiedlichen Randbedingungen und die Vielfalt möglicher Technologien machen es schwierig, das Potenzial der thermischen Energiespeicher allgemein abzuschätzen.

Verfügbarkeit, Hemmnisse und Anreize thermischer Energiespeicher

Industrielle Abwärme steht laut Grote et al [7] mit einem Potenzial von 225 TWh/a zur Verfügung. Dies entspricht laut BVES und Umweltbundesamt [8] [9] 45 % des Wärmebedarfs deutscher Haushalte. Das Potenzial der Abwärme im Temperaturbereich zwischen 100 °C und 500 °C liegt bei knapp 70 TWh. Das Potenzial bis zu 100 °C ist bereits teilweise für die Wärmebereitstellung im Gebäudesektor erschlossen [10].

Große Warmwasserspeicher, wie in Dänemark installiert, weisen mitunter 50 cent/kWh geringe Speicherkapazitätskosten auf [11]. Technologien für große sensible Energiespeicher sind bereits global an vielen Standorten umgesetzt. Inwieweit es in Deutschland geeignete Standorte gibt, gilt es zu prüfen, um das Potenzial optimal auszunutzen.

Im Hochtemperaturbereich (> 100 °C) kann laut einer Studie [10] besonders mit Hilfe von Latentwärmespeichern eine Effizienzsteigerung der Prozesse erzielt werden. Im Rahmen dieser Studie wurde ein

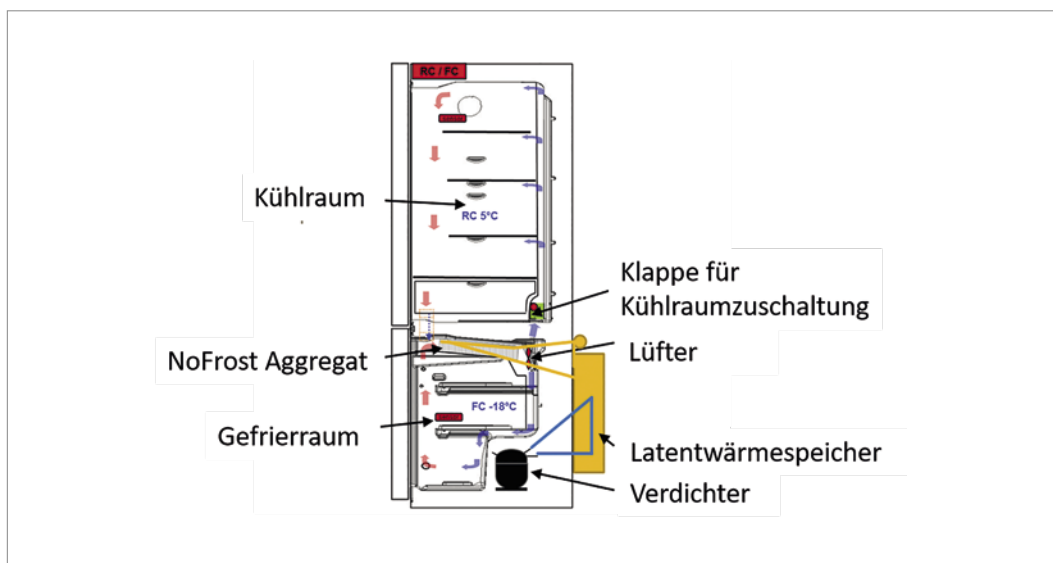


Abbildung 4

**Gefrier-/
Kühlkombination
mit Speicher:**

Design einer Testversion

(Quelle: ZAE, Projekt DiTES4Grid)

Potenzial von knapp 7TWh bis Temperaturen von 600 °C geschätzt. Latentwärmespeicher für solche Anwendungen sind bisher nicht kommerziell verfügbar, die Umsetzbarkeit wurde bereits in Demonstrationsspeichern gezeigt.

Sensible Hochtemperatur-Wärmespeicher sind hierfür ebenso einsetzbar und weiter entwickelt als die Latentwärmespeicher. Auch thermochemische Speicher sind in diesem Temperaturbereich einsetzbar, jedoch ist hierfür noch Forschungsaufwand nötig. Unabhängig davon, in welchem Temperaturbereich ein innovativer thermischer Speicher zum Einsatz kommt, fehlt bisher die Langzeiterfahrung in der industriellen Anwendung. Dadurch stellt die Investition noch ein Risiko dar. Gezielte Förderung von Pilotprojekten könnte das Risiko abfangen und die wissenschaftlichen Betrachtungen würden der Optimierung der Speicherauslegung und des Speicher-managements dienen.

Haushalte sind für mehr als 20% der CO₂-Emissionen verantwortlich. Wärme- und Kältebereitstellung ist ein Hauptteil des Energiebedarfs. In gewissen Grenzen können thermische Energiespeicher zur Entlastung elektrischer Verteilnetze beitragen, indem sie bei Überangebot Energie aufnehmen. Ein Beispiel sind Gefrier-Kühlkombinationen, die mit Latentwärmespeichern ausgerüstet sind (► *Abbildung 4*). Der Betrieb dieser Speicher erfordert allerdings einen lastabhängig variablen Strompreis. Mit solchen Lösungen ließe sich der Eigenstromverbrauch optimieren oder durch ein Vernetzen vieler solcher Geräte eine gezielte Lastenverschiebung ermöglichen.

Eine in diesem Kontext interessante Entwicklung ist eine Speichertechnologie, welche die Diskrepanz zwischen PV- bzw. Windstromüberschüssen und dem

Heizwärmebedarf von Gebäuden im Winter ausgleichen kann. Die Grundlage dafür bildet die reversible chemische Reaktion zwischen gebranntem Kalk und Wasser(dampf) – die Technologie basiert also auf sehr gut verfügbaren, kostengünstigen und ökologisch unbedenklichen Materialien [12]. Unter Aufnahme von Hochtemperaturwärme (ca. 500 °C) setzt das Material Wasserdampf frei, wodurch die Energie mit hohen Energiedichten und über lange Zeiträume gespeichert werden kann. Bei Bedarf kann die nun als chemisches Potenzial vorliegende Energie durch erneute Zugabe des Reaktionspartners freigesetzt werden („Kalklöschchen“). Hierbei sind sehr hohe Reaktionstemperaturen von 600 °C und mehr erreichbar, wenn Wasserdampf als Reaktionspartner verwendet wird. Verfahrenstechnisch deutlich einfacher ist jedoch die Entladung mit flüssigem Wasser, die Temperaturen um ca. 100 °C erreicht und damit noch ausreichend hoch ist für die Wärmeversorgung von Bestandsgebäuden.

Weiteres Potenzial zur Netzlastenverteilung wäre die Kombination aus Wärmepumpe und Wärmespeicher. Ein Anteil der in Zukunft installierten Wärmepumpen, geplant sind 0,5 Millionen pro Jahr ab 2024 [13], könnte Wärmespeicher beladen, sobald ein Überangebot an elektrischer Energie vorliegt. Liegt wenig vor, kann der Speicher entladen und die Wärmepumpe ausgeschaltet werden. Ein Hemmnis für die einfache Integration von thermischen Speichern in der Gebäudetechnik ist die zum Teil fehlende schnelle Bewertung der spezifischen Praxistauglichkeit von Wärme- und Kältespeichern. Um Kennzahlen und die Prüfung thermischer Energiespeicher zu definieren, lief 2022 das Verbund-Projekt VKTES an.

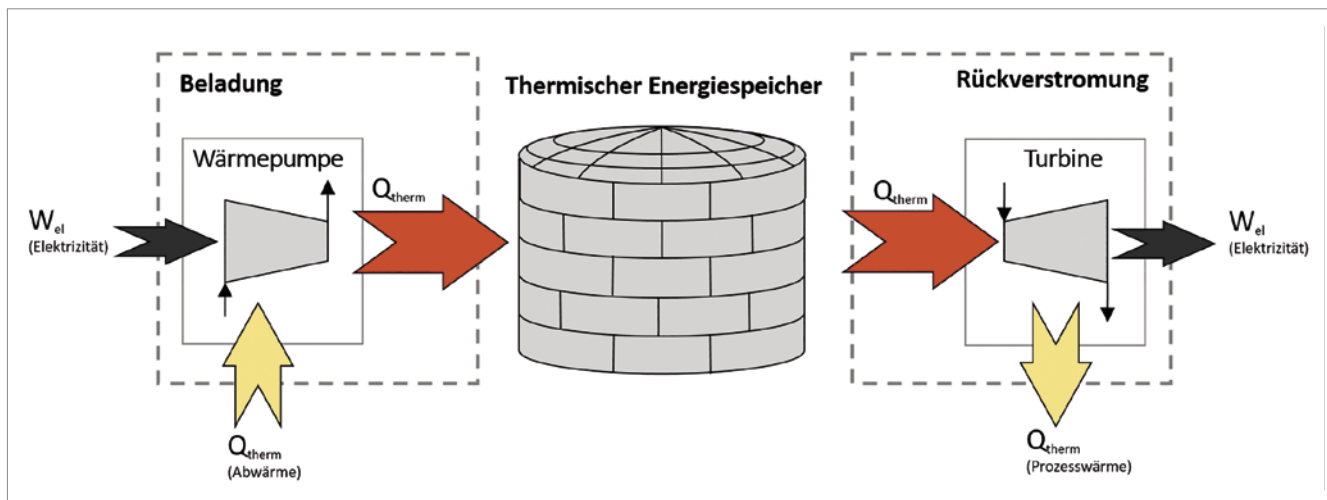


Abbildung 5
Carnot-Batterie
 (Quelle: DLR)

Neben den thermischen Energiespeichertechnologien, welche eine temporäre Koppelung zwischen Verbraucher und Nutzer herstellen, wurden bereits Technologien zur lokalen Koppelung erprobt. Sowohl mobile sorptive Speicher [14] als auch mobile Latentwärmespeicher [15] wurden bereits umgesetzt. Die Wirtschaftlichkeit dieser Techniken ist unter den veränderten Randbedingungen mit steigenden Gaspreisen und im Kontext Betriebssicherheit neu zu bewerten.

Neu diskutiert werden in diesem Zusammenhang auch wärmespeicherbasierte Verfahren zur großmaßstäblichen Stromspeicherung („Carnot-Batterien“, „Elektrowärmekraftwerke“). Neben der reinen Strombereitstellung kann dieser Prozess auch Abwärme aufnehmen und Fern- bzw. Industriewärme bedarfsgerecht bereitstellen (► *Abbildung 5*). Eine auf diese Art zwischen den Sektoren „Strom“ und „Wärme“ positionierte Technologie bietet besondere Chancen: Es können so die Flexibilitätsbedarfe beider Sektoren bedient werden. Damit sind im Vergleich zu reinen Strom- oder Wärmetechnologien grundsätzlich höhere Nutzungsgrade, eine verbesserte Jahresauslastung und damit eine günstigere betriebswirtschaftliche Ausgangsposition möglich.

Es existieren dazu eine größere Zahl von Entwicklungsarbeiten und einige Aktivitäten mit industrieller Ausprägung. Mit dem Ziel der kostengünstigen elektrischen Energiespeicherung im Multi-MW-Maßstab entwickelt die Firma Malta Hochtemperatur Wärmepumpen Stromspeicher GmbH ein Speicherkonzept. Es nutzt einen Brayton-Wärmepumpenprozess zur Beladung und einem Brayton-Wärmekraftprozess zur Rückverstromung. Die thermische Energie wird auf der heißen Seite in Flüssigsalzspeichern und auf der kalten Seite in Kältemittelspeichern unter 0°C gespeichert. Es wird ein Strom-zu-Strom Wirkungs-

grad von etwa 60% angestrebt [16]. MAN Energy Solutions entwickelt ein kombiniertes Energiespeicher- und Wärme- sowie Kälteversorgungskonzept (Etes), das auf einem transkritischen CO_2 -Wärmepumpenprozess zur Stromaufnahme und einem CO_2 -Wärmekraftprozess zur Rückverstromung beruht. Beide Prozesse laufen zwischen einem Eisspeicher auf der kalten Seite und einem kaskadierten Wasserspeicher bis etwa 120°C auf der warmen Seite [17]. Eine Testanlage einer Carnot-Batterie auf Basis eines Rankine-Prozesses wurde kürzlich in Betrieb genommen [18].

Fazit

Das Potenzial thermischer Energiespeicher ist vielseitig. Sie reißen sich neben der elektrischen Energiespeicherung und der Speicherung durch das Synthetisieren von Brennstoffen in die Gruppe der Energiespeicher ein. Bei der Pufferung kurzfristiger Fluktuationen in der Energieversorgung thermischer Systeme bieten sie eine wirtschaftlich attraktive Alternative. Sie sind ebenso ein Werkzeug zur Sektorenkopplung und Effizienzsteigerung. Daher sollten sie sowohl im Energierecht als auch den geltenden Förderrichtlinien berücksichtigt werden, damit ihr Potenzial langfristig die Umsetzung der Energiewende ermöglichen kann.

Referenzen

- [1] Umweltbundesamt, „Umweltbundesamt auf Basis AG Energiebilanzen, Auswertungstabellen zur Energiebilanz der Bundesrepublik Deutschland, Stand 09/2021,“ [Online]. Available: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/private-haushalte-konsum/wohnen/energieverbrauch-privater-haushalte#endenergieverbrauch-der-privaten-haushalte>
- [2] M. Rasch, A. Regett, S. Pichlmair, J. Conrad, S. Greif, A. Guminski, E. Rouyrre, C. Orthofer und T. Zipperle, „Eine anwendungsorientierte Emissionsbilanz – Kosteneffiziente und sektorenübergreifende Dekarbonisierung des Energiesystems, Forschungsstelle für Energiewirtschaft FfE,“ 2017.
- [3] P. Stenzel, L. Kotzur, D. Stolten, J. Figgner, D. Haberschusz, D. Sauer, V. Gottke, F. Valentin, A. Velten, F. Schäfer und S. Zunft, „Energiespeicher - Jahresüberblick 2021 BWK,“ Springer, 2021.
- [4] F. Ausfelder, S. von Roon, A. Seitz, „Flexibilitätsoptionen in der Grundstoffindustrie II. Analyse, Technologien, Beispiele. Bericht des AP V.&. „Flexibilitätsoptionen und Perspektiven in der Grundstoffindustrie“ im Kopernikus-Projekt „SynErgie“, 2019.
- [5] A. Krönauer, S. Hiebler, P. Hook, S. Pöllinger, F. Bailly und M. Laudahn, „Abschlussbericht Bayerisches Zentrum für Angewandte Energieforschung, Energiespeicherung / BSH Haugeräte GmbH, Thermische Speicher als verschiebbare Lasten in elektrischen Netzen – DiTES4Grid“.
- [6] R. Gurtner, D. Eckl und R. Jennes, „Abschlussbericht: Industrielle Abwärmenutzung einer Gießerei durch thermische Energiespeicherung in Kombination mit einem Absorptionsprozess 2022.
- [7] L. Grote, P. Hoffmann und G. Tänzer, „Abwärmenutzung - Potentiale, Hemmnisse und Umsetzungsvorschläge,“ Saarbrücken, 2015.
- [8] BVES, „Energiewende braucht Wärmewende – Wärmewende braucht Energiespeicher“ 2021.
- [9] Umweltbundesamt, „Endenergieverbrauch privater Haushalt,“ 2020. [Online]. Available: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/private-haushalte-konsum/wohnen/energieverbrauch-privater-haushalte#endenergieverbrauch-der-privaten-haushalte>
- [10] F. Toro, E. Jochem und O. Lösch, „Bewertung der thermischen Energiespeicher (Latentwärmespeicher) als eine Komponente industrieller Abwärmenutzung FuE-Bedarf, Marktpotentiale, Hemmnisse und Empfehlungen – ein Statuspapier“ 2022.
- [11] T. Yang, W. Liu, G. Kramer und Q. Sun, „Seasonal thermal energy storage: A techno-economic literature review, Renewable and Sustainable Energy Reviews,“ Renewable and Sustainable Energy Reviews, Bd. 139, 2021.
- [12] M. Schmidt und M. Linder, „A Novel Thermochemical Long Term Storage Concept: Balance of Renewable Electricity and Heat Demand in Buildings“ Frontiers in Energy Research, 2020.
- [13] Bundesverband Wärmepumpen e.V. , „BMWSB & BMWK: 500.000 Wärmepumpen jährlich bis 2024“ 30.6.2022. [Online]. Available: <https://www.waermepumpe.de/presse/news/details/bmwsb-bmwk-500000-waermepumpen-jaehrlich-bis-2024>.
- [14] E. Lävemann, „Abschlussbericht: Mobile Sorptionsspeicher zur industriellen Abwärmenutzung Grundlagen und Demonstrationsanlage: MobS II“ 2015.
- [15] swilar-eetec, 5.10.2022. [Online]. Available: <https://swilar-eetec.de/>.
- [16] B. Bollinger , „Malta Pumped Heat Electricity Storage (PHES) for Coal Exit Transition from Fossil to Renewable Energy,“ in 2nd International Workshop on Carnot Batteries, 2020.
- [17] L. Garcia, E. Jacquemend und P. Jenny, „Thermo-Economic Heat Exchanger Optimization for Electro-Thermal Energy Storage Based on Transcritical CO₂ Cycles.“ in 3th European supercritical CO₂ Conference, Paris, 2019.
- [18] D. Bauer und M. Johnson, „Design, build and initial operation of the CHESTER system,“ in 3rd International Workshop on Carnot Batteries, DLR Stuttgart, 2022.

Sichere Erschließung tiefer Erdwärmequellen als Beitrag zur Wärmewende



GFZ
Prof. Dr. Hannes Hofmann
hannes.hofmann@gfz-potsdam.de

KIT
Prof. Dr. Thomas Kohl
thomas.kohl@kit.edu

UFZ
Dr. Haibing Shao
haibing.shao@ufz.de

Einleitung

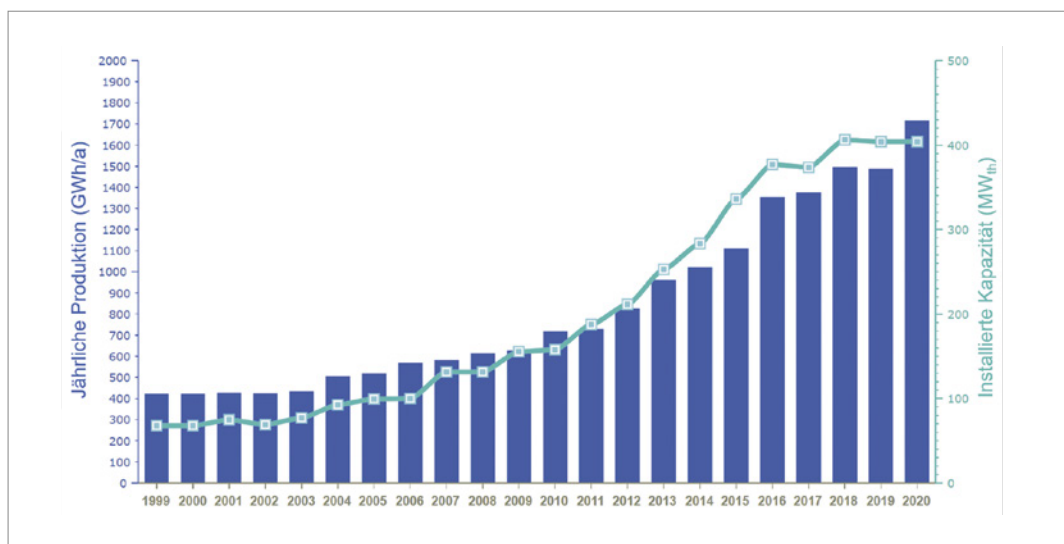
Der Endenergiebedarf für Wärme und Kälte ist in Deutschland etwa doppelt so hoch wie für Elektrizität (AGGE-Stat, 2022). Während die erneuerbaren Energien mit ~41 % schon einen bedeutenden Anteil am Elektrizitätsmix ausmachen, liegt er im Wärmesektor im Jahr 2021 bei nur ~16.5 % (AGGE-Stat, 2022). Den Hauptanteil am erneuerbaren Wärmemix liefert mit 86 % die Biomasse, gefolgt von der oberflächennahen Geothermie und Umweltwärme mit 9 % und der Solarthermie mit 4.2 %. Die tiefe Geothermie hat einen Anteil von nur 0.8 % an der erneuerbaren Wärmeversorgung (AGGE-Stat, 2022).

Von tiefer Geothermie spricht man in Deutschland ab einer Tiefe von 400 m. Die eingesetzte Technologie zur Nutzung der im tiefen Untergrund gespeicherten Wärme hängt von den geologischen Gegebenheiten ab und kann in Mitteleuropa über drei Arten gewonnen werden:

1. In typischen hydrothermalen Systemen in Deutschland wird ~35 bis 180 °C heißes Wasser über ~1 bis 5 km tiefe Bohrlöcher aus geeigneten porösen und durchlässigen Gesteinsschichten gefördert. Das an der Oberfläche genutzte und abgekühlte Wasser wird anschließend über Injektionsbohrungen wieder in den Untergrund zurückgeführt. Hydrothermale Systeme werden in Deutschland seit Jahren sicher und zuverlässig genutzt.
2. Bei Gesteinsschichten mit hoher Temperatur, aber geringer Durchlässigkeit spricht man von petrothermalen Systemen. Das Potenzial dieser Systeme ist um Größenordnungen höher als das der hydrothermalen Systeme, jedoch befinden sich die notwendigen Technologien zur wirtschaftlichen Nutzung petrothormaler Geothermie noch in der Forschungs- und Entwicklungsphase.
3. Aktuell kann die Wärme aus undurchlässigen Gesteinsschichten meist nur über tiefe Erdwärmesonden gewonnen werden. Dabei wird ein Arbeitsmedium durch ein geschlossenes Bohrloch geleitet um dem Gestein konduktiv die Wärme zu entziehen. Dieser Prozess ist jedoch wenig effizient und die Energieausbeute ist relativ gering für den relativ hohen technischen und finanziellen Aufwand von Tiefbohrungen. Der Vorteil dieser Systeme ist, dass es kein Fündigkeitsrisiko gibt.

Neben dem Ziel der Dekarbonisierung hat auch der politische und gesellschaftliche Wille hin zu einer stärkeren Energieunabhängigkeit an Bedeutung gewonnen. Beide Faktoren erfordern eine disruptive Transformation des Wärmesektors. Hier berichten wir über den Stand der tiefen Geothermie in Deutschland, zeigen den potenziellen Beitrag der tiefen Geothermie zur Wärmewende auf und diskutieren notwendige Entwicklungen für einen signifikanten Beitrag der tiefen Geothermie zur Wärmewende.

Abbildung 1
Tiefengeothermische Anlagen:
Entwicklung der installierten thermischen Kapazität und der jährlichen Wärmeproduktion zwischen 2000 und 2020
(Quelle: nach Geotis, 2022)



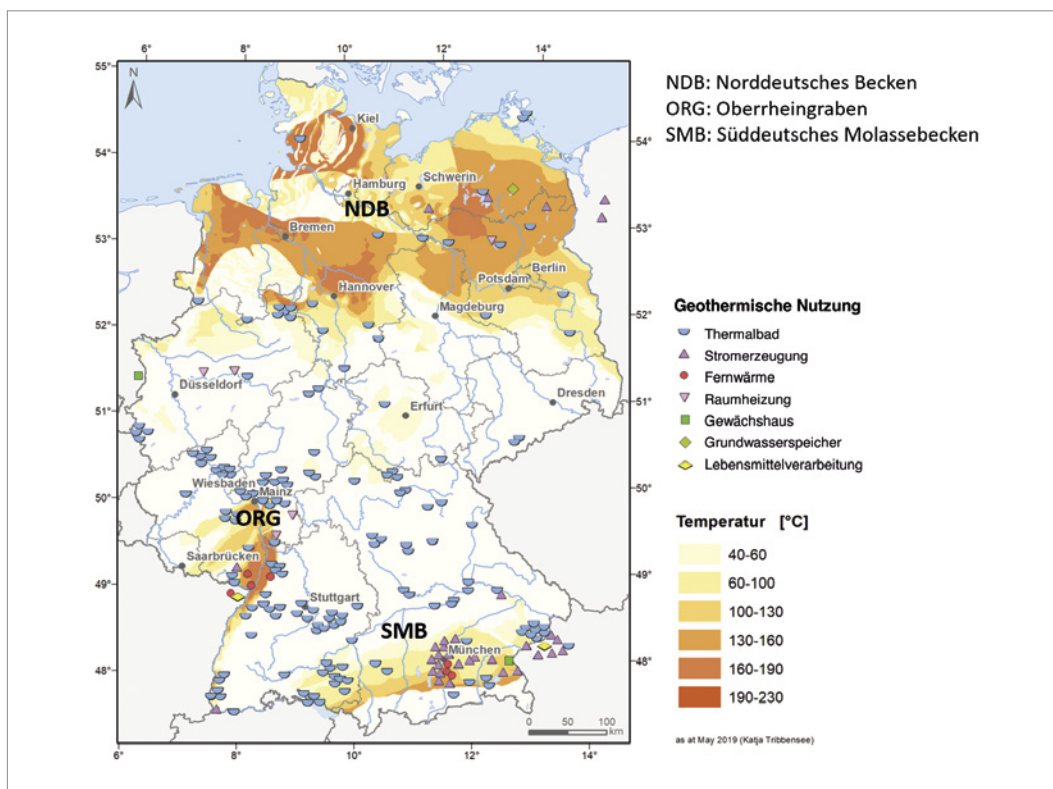


Abbildung 2
Übersichtskarte tiefer Geothermieprojekte 2019.

Die geothermische Nutzung konzentriert sich in Deutschland auf das Süddeutsche Molassebecken, den Oberrheingraben und das Norddeutsche Becken

(Quelle: nach Moeck et al., 2019)

Weiterführende Informationen zu diesen Themen können dem gemeinsamen Strategiepapier von sechs Einrichtungen der Fraunhofer-Gesellschaft und der Helmholtz-Gemeinschaft „Roadmap tiefe Geothermie für Deutschland“ entnommen werden (Bracke und Huenges, 2022).

Stand der tiefen Geothermie in Deutschland

Im europäischen Vergleich ist Deutschland hinter Island, der Türkei, Italien und Frankreich der fünftgrößte Produzent tiefergeothermischer Energie (EGEC, 2020). Insgesamt werden aktuell in Deutschland 42 geothermische Anlagen sicher und zuverlässig betrieben – davon 30 Heizwerke (Wärme), 3 Kraftwerke (Strom) und 9 Heizkraftwerke (Wärme und Strom) (BVG, 2022). Die installierte Wärmeleistung beträgt 350 MW und die installierte elektrische Leistung liegt bei 47 MW (BVG, 2022). Das entspricht etwa 0.1% des gesamten Wärmemix und etwa 0.8% der erneuerbaren Wärme. Wir gehen davon aus, dass sich der begonnene Ausbau der tiefen Geothermie der letzten 20 Jahre (► *Abbildung 1*) in den kommenden Jahren deutlich beschleunigen wird, da sich aktuell 4 Anlagen im Bau und 34 weitere Anlagen in Planung befinden (BVG, 2022). Tiefe Geothermie wird außerdem genutzt um 178

Thermalbäder mit einer zusätzlichen installierten Leistung von 57 MWt zu betreiben. Insgesamt wurden im Jahr 2020 1.717 GWh Wärme aus tiefer Geothermie bereitgestellt, wovon 475 GWh auf Thermalbäder entfallen (Geotiss, 2022).

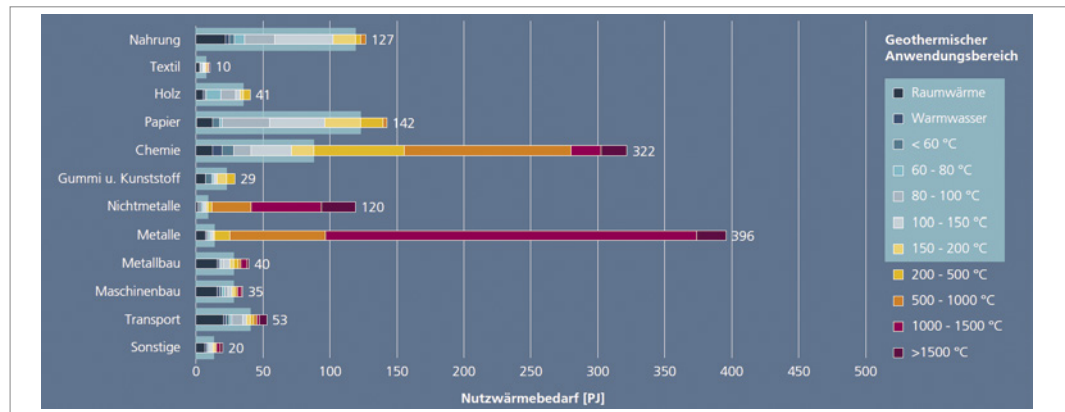
Die Eignung einer Region zur wirtschaftlichen Nutzung von Erdwärme hängt stark von den geologischen Gegebenheiten ab. In Deutschland weisen besonders die folgenden Regionen (► *Abbildung 2*) ein hohes Nutzungspotenzial auf:

Das Süddeutsche Molassebecken ist das bisher am häufigsten geothermisch genutzte Gebiet Deutschlands. Die meisten geothermischen Anlagen konzentrieren sich im Großraum München, wo die tiefe Geothermie auch in Zukunft eine entscheidende Rolle in der Wärmewende spielen wird (Moeck et al., 2019).

Im Oberrheingraben in Südwestdeutschland gibt es die höchsten geothermischen Gradienten in Deutschland. Daher steht diese Region ebenfalls im Fokus für aktuell neu geplante Projekte (Frey et al., 2022).

Das Norddeutsche Becken birgt aufgrund seiner Größe das höchste geothermische Potenzial in Deutschland. Bisher konnte es aufgrund seiner komplizierteren geologischen Verhältnisse jedoch nur in geringem Maße genutzt werden (Frick et al., 2022).

Abbildung 3
**Nutzwärmebedarf und erforderliche
 Temperaturniveaus
 verschiedener
 Industrien und
 geothermischer
 Anwendungsbereiche**
 (Quelle: Bracke und
 Huenges, 2022)



Potenzieller Beitrag der tiefen Geothermie zur Wärmewende in Deutschland

Das hydrothermale Potenzial, also das Potenzial der tiefen Erdwärme, welches mit heutiger Technik erschlossen werden kann, wird auf 300 TWh/a (220–430 TWh/a) geschätzt (Bracke und Huenges, 2022). Das entspricht einer installierten thermischen Leistung von 70 GW oder nahezu 25 % des deutschen Wärmebedarfs.

Dieses Potenzial beinhaltet noch nicht das zusätzliche Potenzial von Energiespeicherung (Schill et al., 2022), Grubenwassernutzung, oberflächennaher Geothermie und petrothermalen Systemen. Ambitionierte Entwicklungsziele für die tiefe Geothermie wären eine Deckung von 5–10 % des Wärmebedarfs in 2030 (~100 TWh/a) und ~20–25 % des Wärmebedarfs in 2040 (~300 TWh/a) (Bracke und Huenges, 2022).

Notwendige Entwicklungen für einen signifikanten Beitrag der tiefen Geothermie zur Wärmewende

Neben den oben genannten ambitionierten Zielen gibt es eine Vielzahl von Maßnahmen, die ergriffen werden können um den Ausbau der tiefen Geothermie zu beschleunigen, u. a.:

- Durch eine detaillierte Erkundung des Untergrundes kann das Fündigkeitsrisiko deutlich gesenkt, Investitionsentscheidungen vereinfacht und die Entwicklung eines Geothermiestandortes beschleunigt werden. Große Teile des geologischen Untergrundes in Deutschland sind nicht ausreichend geothermisch erkundet. Da sich der Wärmebedarf auf urbane Räume und Industriezentren konzentriert, kann ein Explorationsprogramm mit Fokus auf die Ballungszentren

erheblich zur Verringerung des Fündigkeitsrisikos beitragen. Das Erkundungsprogramm sollte in wissenschaftlich begleitete Demonstrationsprojekte münden.

- Geothermieprojekte benötigen eine hohe Anfangsinvestition bei relativ geringen laufenden Kosten. 8–9 von 10 Geothermiebohrungen sind wirtschaftlich nutzbar. Dennoch kann eine einzige unwirtschaftliche Bohrung einen lokalen Wärmeversorger bereits gefährden. Eine Fündigkeitsversicherung, die zunächst alle Kosten (Exploration, Bohrung, etc.) im Falle einer Nicht-Fündigkeit erstattet, würde daher die hohe Eintrittsbarriere der Anfangsinvestitionen verbunden mit dem Fündigkeitsrisiko, verringern.
- Wärmepumpen bis 80 °C sind eine in der Industrie etablierte Technologie. Bis 100 °C sind sie als kommerzielle Schlüsseltechnologie verfügbar. Wärmepumpen bis 140 °C sind im Prototypstatus und >140 °C sind die Entwicklungen im Laborstatus (Bracke und Huenges, 2022). Sie sind ein unverzichtbarer Baustein um Lagerstätten mit geringen Temperaturen nutzbar zu machen. Durch eine Erhöhung der Temperaturen von Wärmepumpen ist zudem eine Erweiterung des industriellen Anwendungsbereichs der Geothermie möglich. Bis 2030 sollte die industrielle Fertigung von Großwärmepumpen in der Leistungsklasse bis 50 MW anlaufen (Bracke und Huenges, 2022).
- Neben geeigneten geologischen Bedingungen bilden Wärmenetze eine weitere Grundlage für einen flächendeckenden Ausbau tiefer Geothermie. Die meisten vorhandenen Wärmenetze sind Hochtemperaturnetze. Ein Ausbau der Wärmenetzinfrastruktur, eine Absenkung der Temperaturen der Wärmenetze und eine gleichzeitige Klimatisierung im Neubaubereich und Sanierung von Bestandsimmobilien ermöglichen eine ökonomischere und effizientere Integration der tiefen Geothermie in die städtische Wärmeversorgung.

- Neben einer Vielzahl von geeigneten Tiefbohranlagen benötigt ein signifikanter Ausbau der tiefen Geothermie auch eine Vielzahl von Fachkräften. Pro GW installierter Leistung werden etwa 5.000 bis 10.000 Arbeitsplätze geschaffen (Bracke und Huenges, 2022). Entsprechend müssen die vorhandenen Ausbildungsmöglichkeiten erweitert werden.
- Zusätzlich ist eine weitere geothermische Technologieentwicklung insbesondere im Bereich der Erkundung (Digitalisierung, Geophysik, Erkundung neuer Lagerstättentypen), Erschließung (Entwicklung neuer Lagerstättentypen und Tauschergeometrien, Bohranlagen) und Produktion (Entwicklung und Anpassung von Förderpumpensystemen an Reservoirbedingungen) notwendig. Ein besseres Prozessverständnis muss dabei die Grundlage für Erkundung, Erschließung und Nutzung geothermischer Lagerstätten bilden. Diese Entwicklungen können durch die Nutzung großskaliger Forschungsinfrastruktur wie dem In-Situ Geothermielabor Groß Schönebeck (Blöcher et al., 2016) im Norddeutschen Becken und dem geplanten geothermischen Untertage-labor GeoLaB (Schätzler et al., 2020) im Oberrheingraben fundamental vorangetrieben werden. Solche Forschungslabore bieten als Dialogplattformen auch Möglichkeiten für partizipative Projekte zur Einbindung gesellschaftlicher Akteure.

Eine Skalierung der installierten Kapazität von 0.4 auf 70 GW (Faktor 175) erfordert industrielle Planungs- und Fertigungsprozesse. Mit geschätzten Kosten von ~2-2.5 Mrd. EUR pro GW installierter Wärmeleistung (~100 Tiefbohrungen) ergibt sich eine Investition von 140–175 Mrd. EUR (~7.000 Tiefbohrungen mit obertätiger Infrastruktur) (Bracke und Huenges, 2022).

Fazit

Tiefe Geothermie hat das Potenzial mit heutiger Technologie mittelfristig ~25 % des deutschen Wärmebedarfs zu decken. Bisher liegt der Anteil der 42 tiefen Geothermieranlagen am Wärmemix bei ~0.1 %. Für einen signifikanten Beitrag zur Wärmewende sind ein fokussiertes Erkundungsprogramm, eine Fündigkeitsversicherung, eine Weiterentwicklung von Großwärmepumpen, die Transformation kommunaler Wärmenetze, umfangreiche Fachkräfteausbildung und gezielte Technologieentwicklung für eine nachhaltige Nutzung geothermischer Ressourcen notwendig.

Die Entwicklung disruptiver Technologien erfordert zudem einen intensiven offenen Dialog zu deren Chancen und Risiken, insbesondere mit der lokalen Bevölkerung. Tiefe Geothermie bietet keine kurzfristige Lösung für die Wärmewende, sondern zeigt mit einem potenziell bedeutenden Beitrag zu einem klimaneutralen unabhängigen Wärmemix eine langfristige Perspektive auf.

Referenzen

- AGEE-Stat (2022). Erneuerbare Energien in Deutschland. Daten zur Entwicklung im Jahr 2021. Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik, Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/erneuerbare-energien-in-deutschland-2021>
- Blöcher, G., Reinsch, T., Henniges, J., Milsch, H., Regenspurg, S., Kummerow, J., Francke, H., Kranz, S., Saadat, A., Zimmermann, G. (2016). Hydraulic history and current state of the deep geothermal reservoir Groß Schönebeck. *Geothermics* 63:27-43. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geothermics.2015.07.008>
- Bracke, R. und Huenges, E. (Hrsg.) (2022). Roadmap Tiefe Geothermie für Deutschland. <https://doi.org/10.24406/ieg-n-645792>
- BVG (2022). Geothermie in Zahlen. Bundesverband Geothermie. <https://www.geothermie.de/geothermie/geothermie-in-zahlen.html>
- EGEC (2021). 2020 EGEC Geothermal Market Report. European Geothermal Energy Council. <https://www.egec.org/media-publications/egec-geothermal-market-report-2020/>
- Frey, M., Bär, K., Stober, I., Reinecker, J., van der Vaart, J., Sass, I. (2022). Assessment of deep geothermal research and development in the Upper Rhine Graben. *Geothermal Energy* 10(18). <https://doi.org/10.1186/s40517-022-00226-2>
- Frick, M., Kranz, S., Norden, B., Bruhn, D., Fuchs, S. (2022). Geothermal resources and ATES potential of Mesozoic reservoirs in the North German Basin. *Energies* 15 (1980). <https://doi.org/10.3390/en15061980>
- GeotIS (2022). Geothermal Information System. <http://doi.org/10.17616/R3M89J>
- Moeck, I.S., Dussel, M., Weber, J., Schintgen, T., Wolfgramm, M. (2019). Geothermal play typing in Germany, case study Molasse Basin: a modern concept to categorise geothermal resources related to crustal permeability. *Netherlands Journal of Geosciences* 98(e14). <https://doi.org/10.1017/njg.2019.12>
- Schätzler, K., Bremer, J., Schill, E., Kohl, T., Kühn, M., Kolditz, O., Sass, I. (2020). GeoLaB – Das geowissenschaftliche Zukunftsprojekt für Deutschland. Mining Report Glückauf, Dezember 2020. <https://mining-report.de/geolab-das-geowissenschaftliche-zukunftsprojekt-fuer-deutschland/>
- Schill, E., Waczowicz, S., Bracke, R., Sass, I., Rink, K. (2022). Wärmenetz-gekoppelte Speicherung im tiefen Untergrund. Jahrestagung 2022 des Forschungsverbands Erneuerbare Energien, Berlin, 12–13 Oktober 2022; S.96–101)

Systemdienliche Wärmeversorgung aus Biomasse

Bioenergie spielt mit einem Anteil von 86% an den erneuerbaren Energien im Wärmesektor aktuell eine tragende Rolle. Auch künftig bleibt sie, wenn auch mit geringerem Anteil, im System. Großteile der biogenen Energie im Wärmesektor stammen aus Festbrennstoffen, die bei der Wärmebereitstellung (u. a. Prozesswärmeerstellung, Beheizung von Gebäuden) jedoch oftmals als alleinige Energielieferanten verwendet werden, wobei sie dann an Effizienz für das gesamte Energiesystem verlieren.

Eine Wärmeversorgung der Zukunft benötigt eine smarte und systemdienliche Integration der wertvollen und begrenzten Bioenergie. Systemdienlich meint dabei den größtmöglichen Mehrwert für das gesamte Energiesystem. Dieser Beitrag beschäftigt sich mit verschiedenen Lösungsansätzen zur Wärmebereitstellung aus Biomasse und wie diese effizienter und nachhaltiger im Energiesystem genutzt werden kann.

1. Stellenwert der Biomassenutzung im Wärmesektor

Für die Hälfte des Endenergieverbrauchs Deutschlands ist der Wärmesektor verantwortlich [1]. Der Anteil an erneuerbaren Energien im Wärmesektor beträgt insgesamt 16,5%, davon sind 86% Bioenergien.

Mit über 75% haben biogene Festbrennstoffe den relevantesten biogenen Anteil. Zum Sortiment gehören Scheitholz, Briketts, Pellets und Hackschnitzel. Diese Brennstoffe werden vor allem in Einzelraumfeuerstätten, Biomassekesseln und Heizkraftwerken eingesetzt.

Zur gasförmigen Biomasse zählen Biogas, Biomethan, Klärgas und Deponiegas, die für die Wärmeversorgung verwendet werden.

Eine kleinere Rolle bei der Wärmeerzeugung übernehmen biogene Anteile des Abfalls und Flüssigbrennstoffe.

Die Integration der Bioenergie in einen vollständig erneuerbaren Wärmesektor stellt die Biomassenutzung vor Herausforderungen, da diese häufig für die systemdienliche Versorgung noch nicht vollständig ausgerichtet ist.

2. Szenarien im Wärmesektor

Mithilfe von Energieszenarien lassen sich künftige Möglichkeiten der Biomasseinsatzbereiche veranschaulichen. Das Deutsche Biomasseforschungszentrum (DBFZ) und das Umweltforschungszentrum (UFZ) haben Szenarien (im BenOpt-Modell) bis in das Jahr 2050 modelliert [2, 3].

Die Szenarien zeigen, dass die größten Anteile des limitierten heimischen Biomassepotenzials langfristig (2050) am kostenoptimalsten im Wärmesektor eingesetzt werden sollten. Besonders in Industrieanwendungen mit Hochtemperatur wurden holzige Reststoffe als kostenoptimal identifiziert, die unter Ergänzung von Anbaubiomasse als Brennstoffe genutzt werden können. Zukunftsfähig sind zum Beispiel der Anbau des Süßgrases *Miscanthus* oder Holz aus Kurzumtriebsplantagen (KUP). Anbaubiomasse ist auch im Gebäudesektor langfristig eine wettbewerbsfähige Option, vor allem bei hybriden Heizungssystemen mit einer Kombination aus Pelletkessel und Wärmepumpe oder auch kombiniert mit Solarthermie. Die Rolle der vergärbaren Reststoffe wird langfristig flexibel in Form von Biomethan in verschiedensten schwer zu dekarbonisierenden Wärmeanwendungen eingesetzt, wie z. B. in Hochtemperaturindustrien (► [Abbildung 1](#)).

Weitere Auswertungen von Szenarien zeigen die sehr vielfältigen Funktionen von Bioenergie in den Endnutzungssektoren [4]. Im Wärmesektor soll laut Szarka [5] Biomasse als Systemstabilisator Energie in KWK-Systemen bereitstellen. Die Rolle der Biomasse im Bereich der privaten Haushalte (PHH) bleibt laut ► [Abbildung 2](#) ungefähr konstant, während ihre Bedeutung in der Industrie zunimmt. Die Auswertung zeigt außerdem die Relevanz von Kurzumtriebsplantagen (KUP), um erhöhte Holzbedarfe zukünftig zu decken.



DBFZ

Dr. Nora Szarka
nora.szarka@dbfz.de

Dr. Volker Lenz
volker.lenz@dbfz.de

Prof. Dr. Ingo Hartmann
ingo.hartmann@dbfz.de

DLR

Dr. Peter Kutne
peter.kutne@dlr.de

ISFH

Oliver Mercker
mercker@isfh.de

IZES

Bernhard Wern
wern@izes.de

UFZ

Dr. Matthias Jordan
matthias.jordan@ufz.de

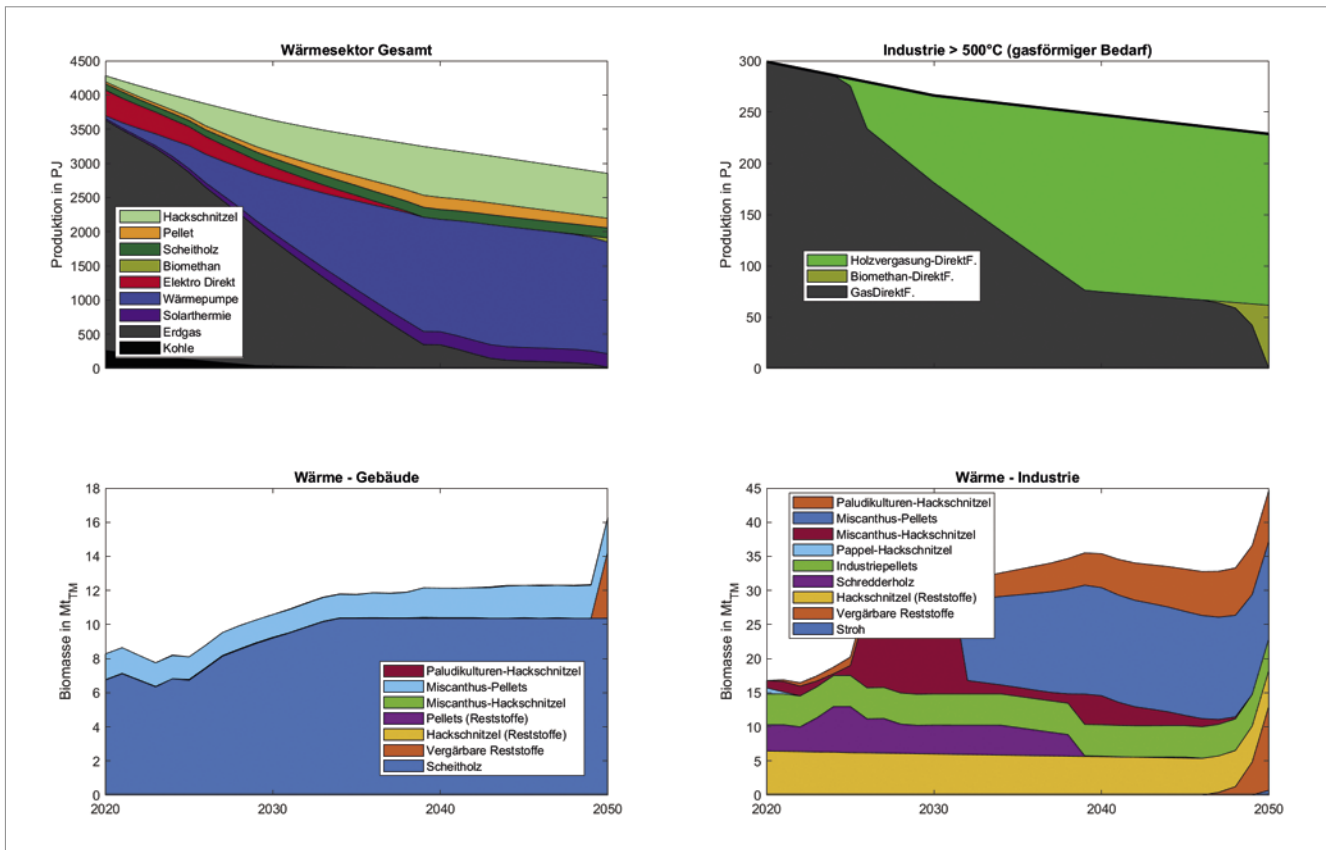


Abbildung 1

Energieszenarien zur Biomassenutzung:

Ausgewählte Ergebnisse der BenOpt-Modellierung zur Energieproduktion und Biomassenutzung im Ziel-Szenario „Starker CO₂-Preis“.

(Quelle: DBFZ und UFZ)

3. Konzepte der systemdienlichen Wärmeversorgung

Begrenzte Anbauflächen und erhöhte Bedarfe an Biomasse aus den Bereichen Energie, Ernährung und stofflicher Nutzung führen zu Nutzungskonkurrenzen. Biomasse wird nachweislich knapper und ist eine verhältnismäßig kostenintensive Ressource, weshalb sie systemdienlich eingesetzt werden muss.

Im Projekt SmarKt (FKZ BMWK 03KB1 30) wurden die Kriterien der Systemdienlichkeit definiert:

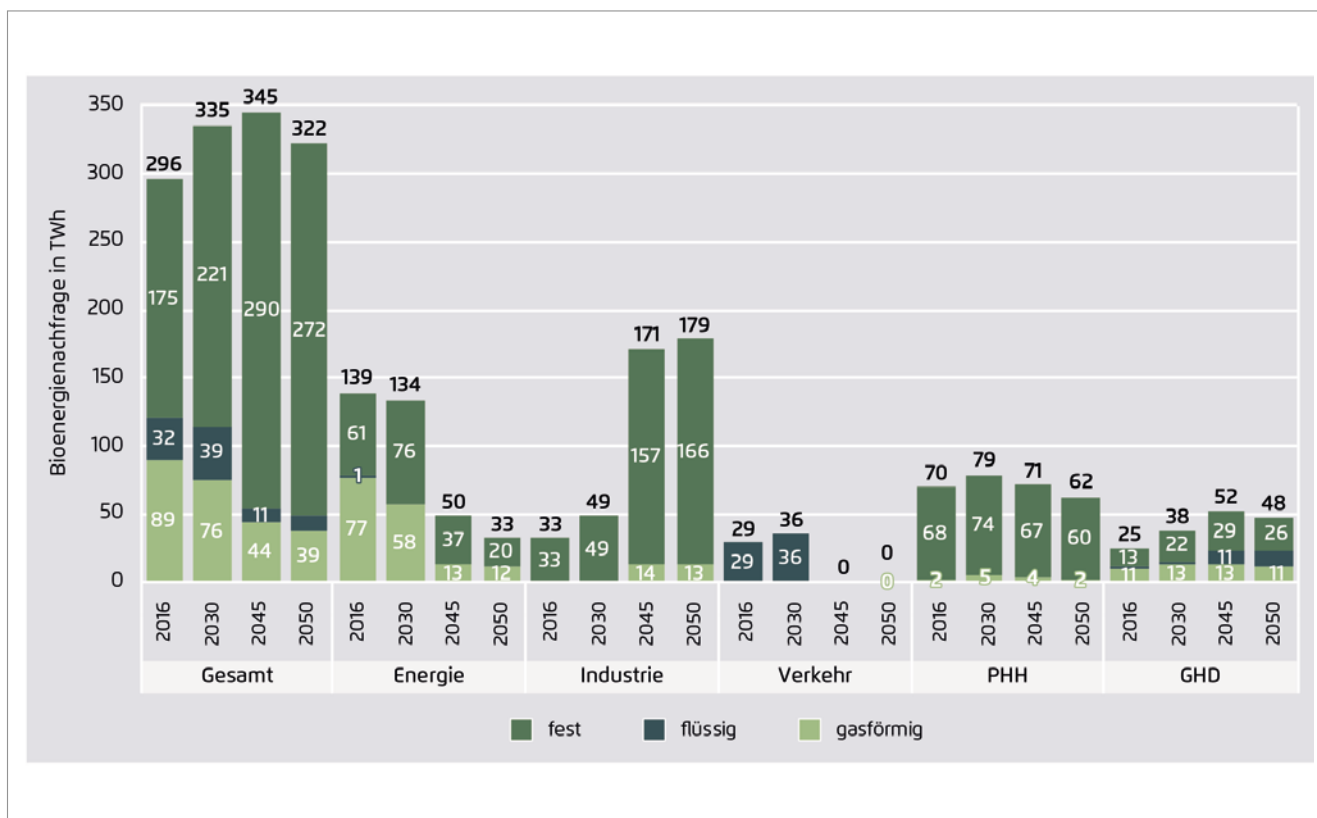
1. nachhaltige und energiereiche Biomasse bereitstellen
2. smarte Bioenergieanlagen einsetzen
3. systemdienliche Integration

Biomasse soll entsprechend aufbereitet werden und in flexiblen und emissionsarmen Konzepten, kombiniert mit anderen Erneuerbaren, zur stofflich-energetischen Bereitstellung beitragen. (► **Abbildung 3**) Folgend werden Beispiele für Lösungskonzepte im Wärmesektor beschrieben.

3.1. Brennstoffaufbereitung

Insbesondere die Eignung von Primärholz für die energetische Nutzung wird intensiv diskutiert. Das Erschließen von alternativen, möglichst schnell nachwachsenden Biomassen als Brennstoff, z.B. unter Verwendung von Reststoffen und Nebenprodukten einjähriger Pflanzen sowie langjährig genutzte biogene Abfälle, sind an dieser Stelle von wachsender Bedeutung. Hier können wenig verholzte Biomassen einen nennenswerten Beitrag leisten. Um ihre chemischen Verbrennungseigenschaften einzustellen, müssen sie aufgearbeitet und gewaschen werden [6]. So kann zum Beispiel Laub zu einem hochwertigen Brennstoff werden, für den derzeit ein Zulassungsverfahren nach Nr. 13 der 1. BImSchV läuft („MobiFuel“, BMWK 03KB136A).

Darüber hinaus ist für den Einsatz von Rest- und Abfallstoffen in hochwertigen Anwendungen zu klären, wie unabhängig vom inhaltsstofflichen Zustand der Biomasse die rechtliche Abfallklassifizierung aufgehoben werden kann. Hierzu wird aktuell die Erarbeitung einer Muster-Abfallverordnung vorangetrieben (Abfallende, BMWK 03KB160A).



3.2. Flexibilität durch Sektorenkopplung

Biomasse soll ein integrierter Teil des sich ändernden Energiesystems werden. Um dies zu realisieren, können Endenergie-Sektoren wie der Strom- und Verkehrssektor gekoppelt werden. Der Einsatz von Biomasse als Energieträger zur Kompensation von fluktuierenden erneuerbaren Energiequellen (z. B. Wind oder Solar) kann einen wichtigen Beitrag zur Versorgungssicherheit leisten. Neue Technologien machen die Sektorenkopplung unterschiedlicher Energiesektoren möglich und das Produktspektrum herkömmlicher Anlagen wird erweitert.

Ein Beispiel für die Kopplung der Sektoren Energie und Verkehr stellt die Erweiterung eines Biogas-Blockheizkraftwerks (BHKW) durch eine Brennstoffaufbereitung dar. Dieses System wandelt Biogas in Wasserstoff um (Schema in ► *Abbildung 4*). Durch die lokale Produktion von Wasserstoff bietet ein solches Konzept einen schnellen und kostengünstigen Einstieg in die Wasserstoffmobilität und Wasserstoffwirtschaft. In Kombination mit städtischen Nutzungskonzepten im Nahverkehr, ist auch eine konstante Abnahme von Wasserstoff möglich.

Ein aktuelles Forschungsthema bezieht sich auf das brennstoffflexible Gasturbinen-BHKW. Dieses kann bei Bedarf an Wärme und Strom des lokalen Netzes oder zur Stabilisierung des Verteilnetzes sowohl mit Biogas als auch mit Wasserstoff betrieben werden.

Dadurch wird der Speicherbedarf für die einzelnen Gase reduziert und die Flexibilität der Anlage wird weiter erhöht.

3.3. Stofflich-energetische Nutzung

Bei der stofflich-energetischen Herstellung geht es darum, die energetische Nutzung so anzupassen, dass Elemente der Biomasse (z. B. Silizium) als Rohstoff für weitere Produktionsprozesse genutzt werden können.

Das Projekt „BioBeton“ beschäftigt sich mit dem Einsatz von Aschen aus der Biomasseverbrennung für die Klinker- und Betonherstellung mit dem Ziel, Aschen aus Kohlekraftwerken zu ersetzen („BioBeton“, BMWK - AiF KK5045102K10).

3.4. Hybrid-Konzepte

Es gibt zahlreiche hybride Versorgungsoptionen mit Biomasse, eine Übersicht zeigt ► *Abbildung 5*.

In der Vergangenheit wurde beim Austausch einer fossilen Heizung gegen eine erneuerbare Raumwärmeversorgung meistens zwischen einer Wärmepumpe (aufgrund der Eignung des Gebäudes) oder einer Biomasselösung (aufgrund vorhandener günstiger Holzbrennstoffen oder Holzpellets) gewählt.

Abbildung 2

Biomassenutzung:
Entwicklung in den verschiedenen Sektoren
(Szenarienauswertung, Quelle: Prognos, Öko-Institut, Wuppertal Institut (2021))

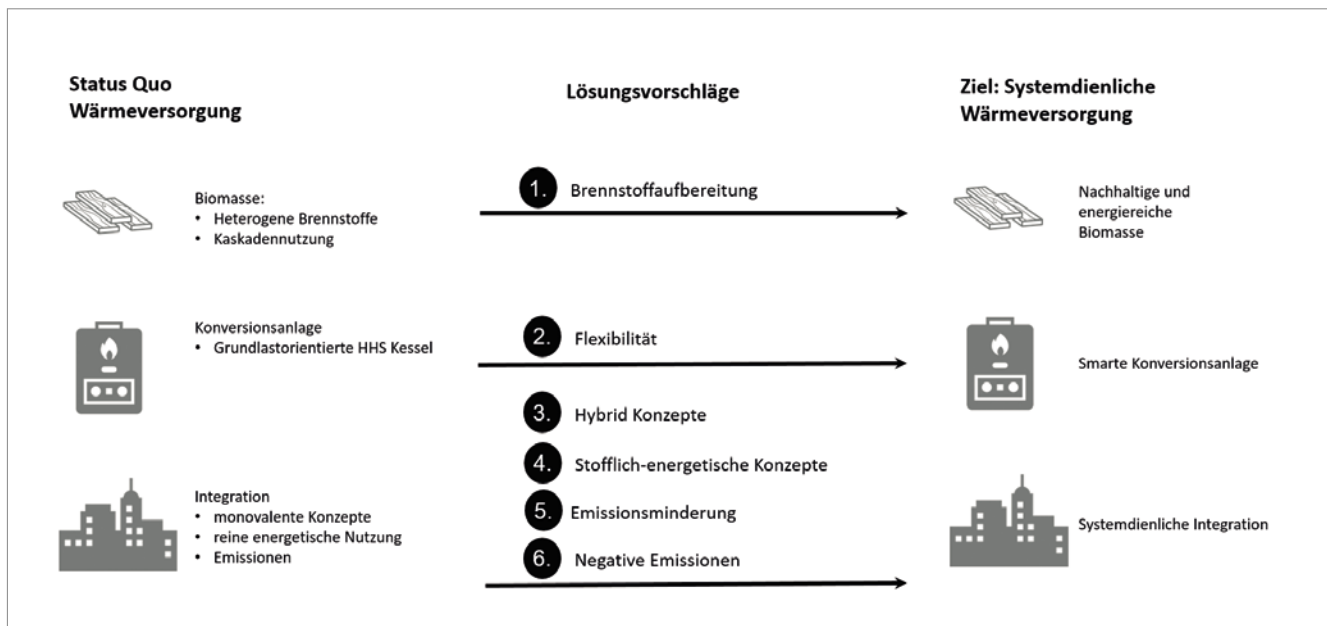


Abbildung 3

Lösungsvorschläge für systemdienliche Wärmeversorgung

(Quelle: Eigene Darstellung, Szarka, DBFZ)

Da Biomasse begrenzt ist, kann sie nicht die alleinige Lösung für Heizsysteme sein. Es müssen kombinierte Technologien (Biomassekessel oder Öfen mit Wassertasche) mit Wärmepumpen (meist Luft-Wasser-Wärmepumpe) eingesetzt werden. Die Wärmepumpe kann 8 bis 9 Monate im Jahr das Gebäude mit hohen Arbeitszahlen allein versorgen, im Winter wird sie durch Biomasse unterstützt und erzeugt ausreichend hohe Vorlauftemperaturen. Neben hoher Versorgungssicherheit bei minimiertem Biomasseeinsatz können diese Konzepte auf Preisschwankungen bei Strom- bzw. Biomassepreisen flexibler reagieren.

Biogas betriebene dezentrale KWK

Biogas betriebene dezentrale Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen (KWK) können genutzt werden, um Netzinstabilitäten auszugleichen, die durch einen plötzlichen Wegfall fluktuierender erneuerbarer Quellen entstehen. Darüber hinaus liefern diese Anlagen neben elektrischem Strom auch Restwärme für nachgelagerte Prozesse oder für die Beheizung von Wohngebäuden.

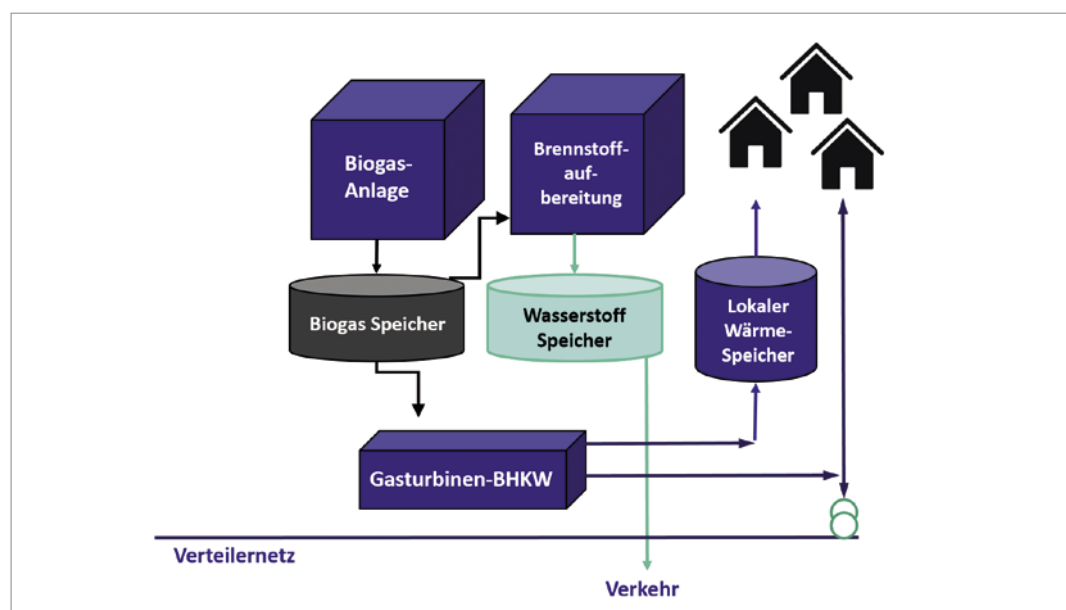
Um Netzinstabilitäten entgegenzuwirken, die durch Überproduktionen erneuerbaren Stroms entstehen, werden aktuell Konzepte untersucht, die Hochtemperatur-Wärmespeicher mit Mikrogasturbinen (MGT)-basierten KWK-Anlagen kombinieren [7]. In diesen Systemen wird der Wärmespeicher zwischen dem

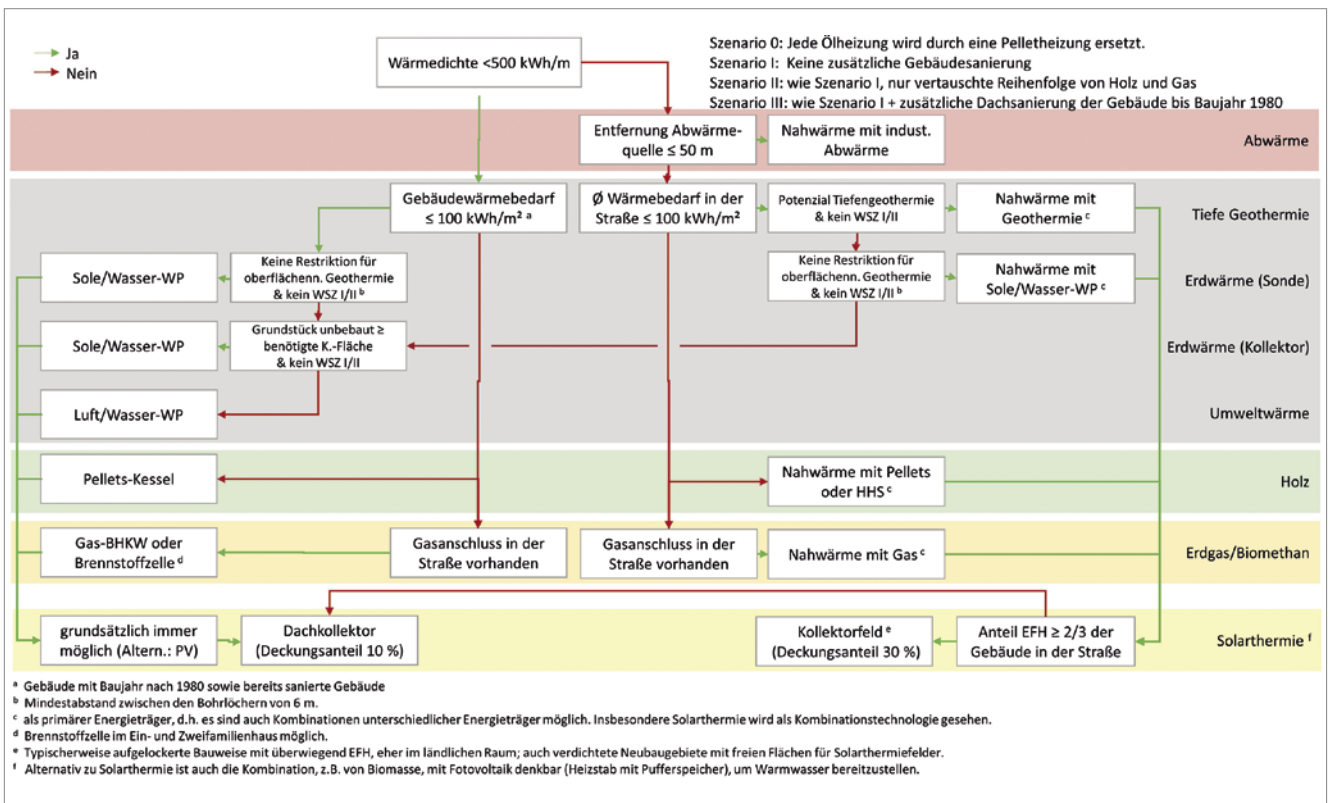
Abbildung 4

Sektorenkopplung:

Erweiterung eines Biogas BHKWs durch eine Brennstoffaufbereitung

(Quelle: DLR)





sogenannten Rekuperator und der Brennkammer der Gasturbine integriert (► *Abbildung 6*). Erneuerbarer Strom wird dann als Wärme gespeichert, wenn die Produktion die Nachfrage übersteigt und die Strompreise niedrig sind. Die Wärme wird wiederum bei entsprechendem Bedarf in Form von Strom- und Wärme bereitgestellt, was sowohl ökologische als auch wirtschaftliche Vorteile mit sich bringt. Im Vergleich zu herkömmlichen KWK-Technologien sind MGT-basierte KWK-Systeme für eine solche Kopplung geeignet. Dies liegt an ihrer Funktionsweise und hohen Brennstoffflexibilität bei gleichzeitig geringen Schadstoffemissionen, geringen Wartungskosten, niedrigen Geräuschemissionen und einer hohen Lastflexibilität.

Biomasse mit Wärmepumpe zur Raumheizwärme- und Trinkwarmwasserbereitung

Ein hybrides Konzept zur Raumheizwärme- und Trinkwarmwasserbereitung wurde im Projekt „OptDienE“ (FKZ: 3KB138 A/B) untersucht. Ausgehend von einem Referenzsystem mit einer Luftwärmepumpe wurde der Frage nachgegangen, in welchem Maße durch den geeigneten Einsatz einer Einzelraumfeuerstätte (Pelletkessel oder Scheitholzofen) der Stromverbrauch der Wärmepumpen (WP) zu Spitzenlastzeiten des Stromnetzes verringert werden kann. Hierfür wurde das in ► *Abbildung 7a* dargestellte Wärmeversorgungskonzept in einer Systemsimulationsumgebung umgesetzt und in ein Einfamilienhausmodell integriert.

Abbildung 5
**Hybride Versorgungs-
optionen mit Biomasse**
(Quelle: IZES (2020))

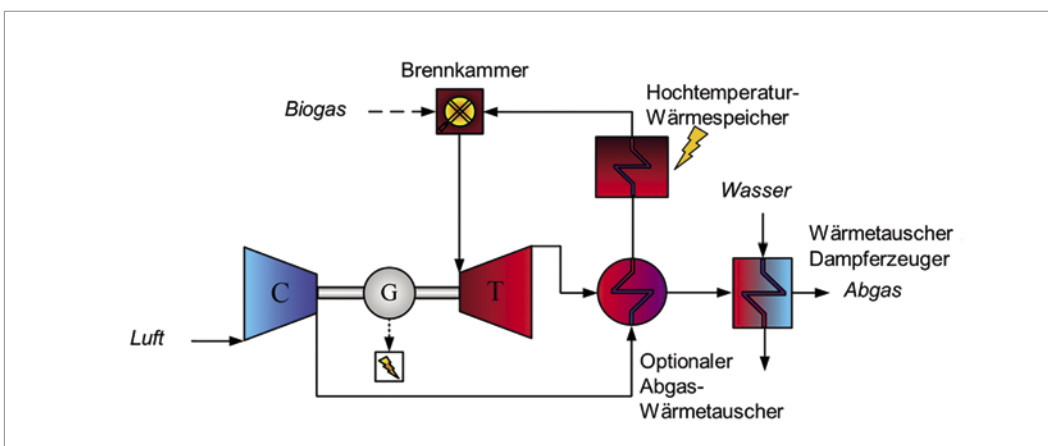
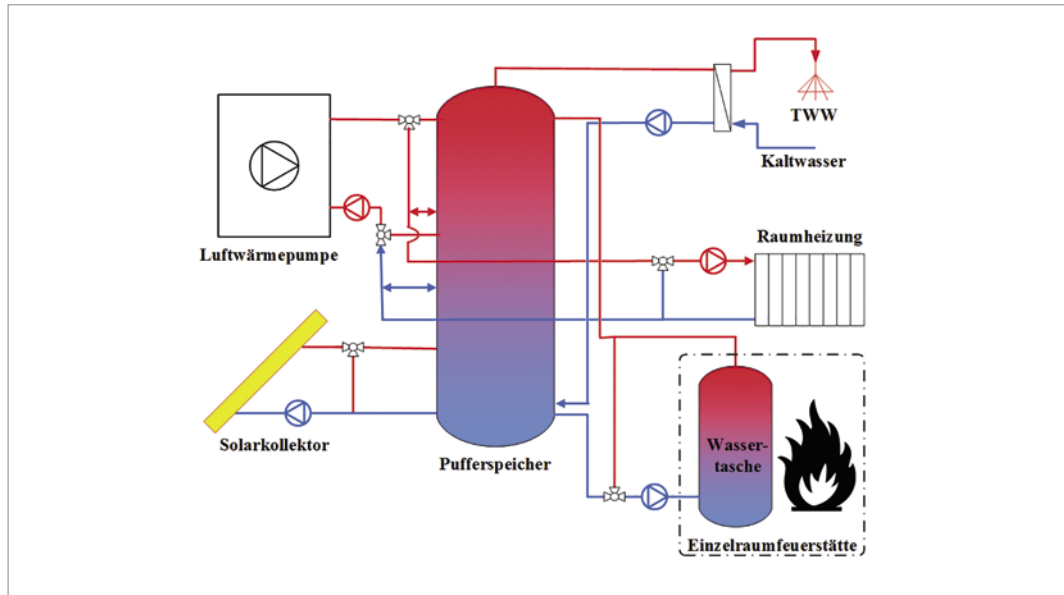


Abbildung 6
**Kombination von
Hochtemperatur-
Wärmespeicher mit
Mikrogasturbinen
(MGT)-basierten
KWK-Anlagen**
(Quelle: DLR)

Abbildung 7a
Wärmeversorgungskonzept Biomasse mit Wärmepumpe
 zur Raumheizwärme- und Trinkwarmwasserbereitung
 (Quelle: ISFH)



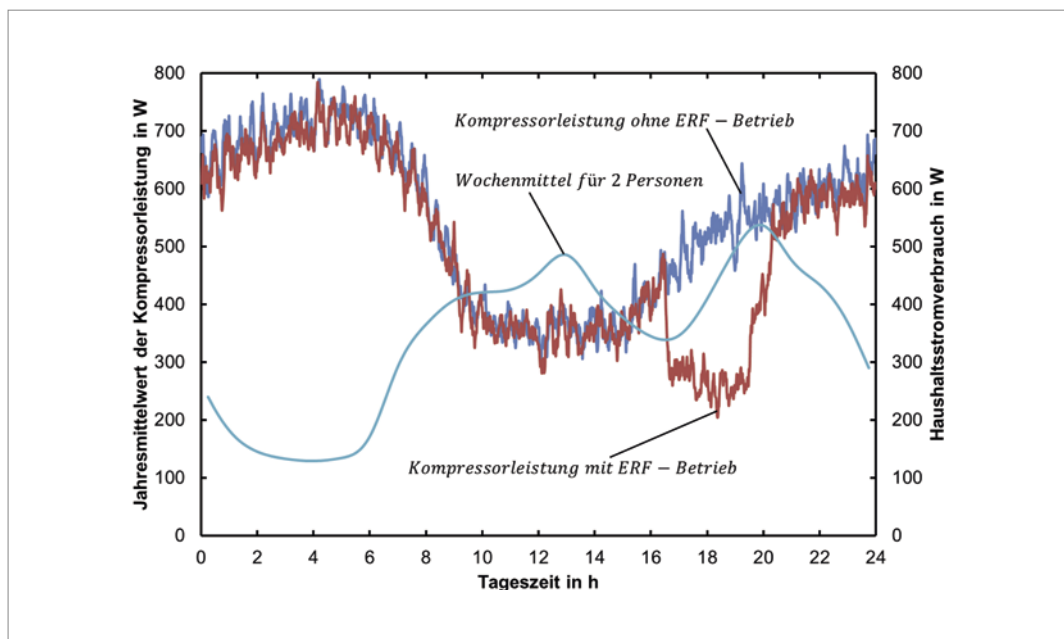
Die Einzelraumfeuerung (ERF) wurde zudem in einigen Simulationen mit einer Wassertasche ausgestattet, um die Auswirkungen einer unterschiedlich starken Wärmelieferung der ERF an den zentralen Pufferspeicher zu untersuchen. In ► **Abbildung 7b** ist der Einfluss des ERF-Betriebs anhand der Jahresmittelwerte der Kompressorleistung der WP dargestellt.

Die Ergebnisse der Untersuchung zeigten, dass durch den ERF-Einsatz eine signifikante Reduktion des Jahresstromverbrauchs zur Abendspitze des Standardlastprofils für Haushaltsstrom um bis zu 70% erreicht werden kann. Die Nutzbarkeit der ERF-Wärme steigt durch den Einsatz einer Wassertasche. Auch die Thermosensibilität sinkt um bis zu 40%.

Für Hersteller und Anlagenplaner ergeben sich daraus folgende Anforderungen:

1. Für hochgedämmte Gebäude sind ERF mit kleineren Nennleistungen zu entwickeln und einzusetzen.
2. ERF sollten regulär mit einer Wassertasche ausgestattet sein, um die Netzdienlichkeit zu erhöhen.
3. Zur Steigerung der Systemeffizienz der Wärmeversorgung des Gebäudes sind angepasste ERF-Betriebskonzepte zu entwickeln.

Abbildung 7b
Einfluss des Einzelraumfeuerungsbetriebs
 anhand der Jahresmittelwerte der Kompressorleistung der Wärmepumpe
 (Quelle: ISFH)



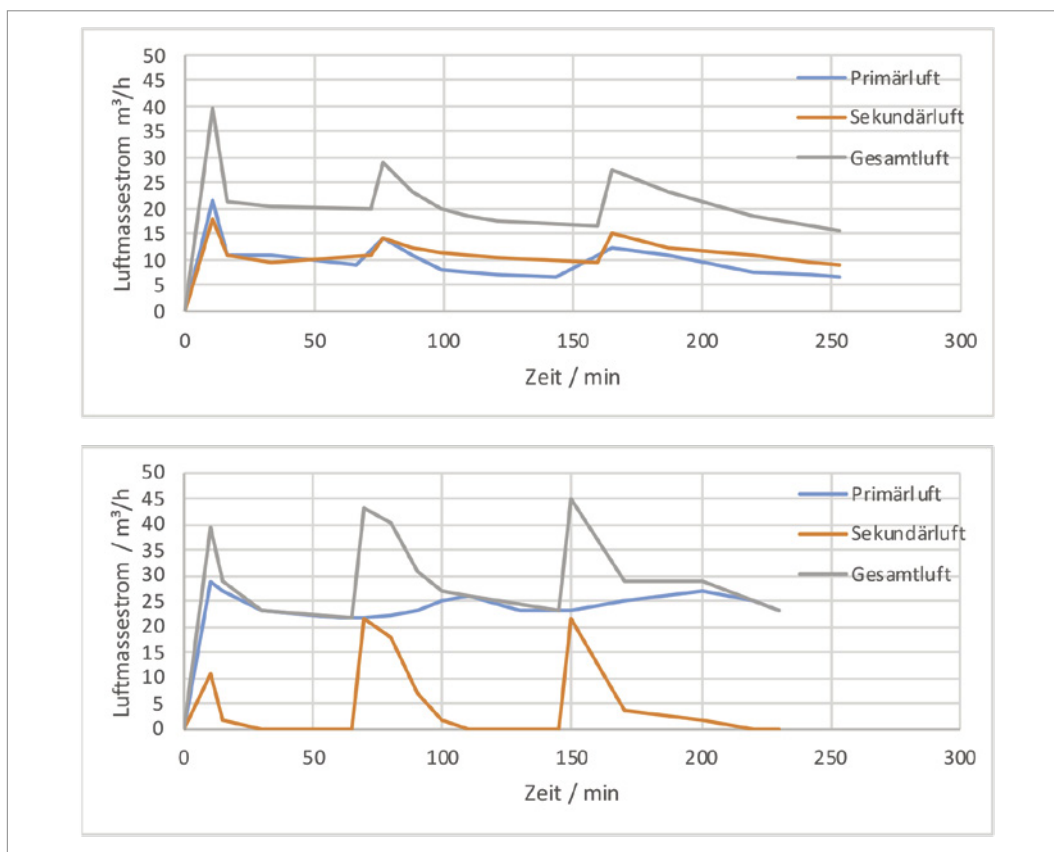


Abbildung 8

Emissionsminderungsmaßnahmen:

• oben: Effekt der vergleichmäßigten, sensorgestützten, automatischen Verbrennungsluftregelung an einem Scheitholzofen

• unten zum Vergleich: händische Luftsteuerung Entwicklung der Regelung durch die Hochschule Karlsruhe im Forschungsprojekt UVV – Umweltverträgliche Verbrennung

(Quelle: BMEL/FNR, FKZ: 22038418, <https://www.dbfz.de/uvv>)

3.5. Emissionsminderung

Je nach Feuerungsart und Biomassebrennstoffe haben Wärmeerzeuger für feste Biomasse zum Teil erhebliche Emissionslasten an Feinstaub (PM 2,5) und anderen Luftschadstoffen (z.B. CO, NOx und PAK), selbst wenn Verbrennungsprozesse kontinuierlich verbessert und Brennstoffe normgerecht verwendet werden. Die Schadstoffe können zu Gesundheitsgefahren und zur Beeinträchtigung von Anwohner*innen, z. B. durch Gerüche, führen. Integrierte und nachgeschaltete sekundäre Emissionsminderungsanlagen können Abhilfe schaffen und das Emissionsniveau drastisch senken. Im Projekt „Umweltverträgliche Verbrennung“ (FKZ 22038418) wurde die anlagenintegrierte Emissionsminderung durch den Einsatz von sensorgestützten Verbrennungsluftregelungen, Katalysatorintegration und elektrostatischer Staubabscheidung an einem Holzhackschnitzelkessel (Leistungsbereich von 50 bis 1000 kW) untersucht. Außerdem wurde eine Scheitholz einzelaumfeuerungs im Leistungsbereich von 10 kW untersucht. Die Projektergebnisse zeigen, dass an beiden Anlagentypen eine Minderung der Staubemissionen von ca. 100 mg/m³ auf unter 10 mg/m³ unter praxisnahen Bedingungen möglich ist. Effektive sekundäre Emissionsminderungsmaßnahmen sind somit auch in Einzelraumfeuerstätten möglich (► *Abbildung 8*).

Im Diagramm unten sind die Spitzen in der Luftzufuhr sowie ein hoher Primärluftanteil gut erkennbar, es ergibt sich eine Gesamtluftzufuhr im Bereich von 22 bis 40 m³/h bei Nennlast, eine Staubemission von 55 bis 65 mg/m³ und eine CO-Emission von ca. 1 g/m³ (jeweils im Normzustand und 13 Vol.-% O₂). Im Diagramm oben ist durch die Luftregelung eine deutlich gleichmäßigere Luftzufuhr mit einem Primär- und Sekundärluftverhältnis von ca. 1:1 und ein Gesamtluftvolumenstrom von 16 bis 29 m³/h bei Nennlast ermöglicht worden, wobei die Emissionswerte bei 10 bis 25 mg/m³ für Staub und ca. 0,2 g/m³ bei CO (jeweils im Normzustand und 13 Vol.-% O₂) liegen, woraus eine Staubminderung von 60 bis 80 % und eine CO-Minderung von 80 % resultiert.

3.6. Negative Emissionen

Um Klimaneutralität zu erreichen, müssen weitgehend unvermeidbare THG-Emissionen (z. B. tierische Methanemissionen und Lachgasemissionen aus der Landwirtschaft) kompensiert werden. Aus diesem Grund und wegen des vorangeschrittenen CO₂-Ausstoßes gehen viele Forschungsergebnisse (beispielsweise Szenarien des IPCC) davon aus, dass das 1,5°C-Ziel nur mit negativen Emissionen eingehalten werden kann.

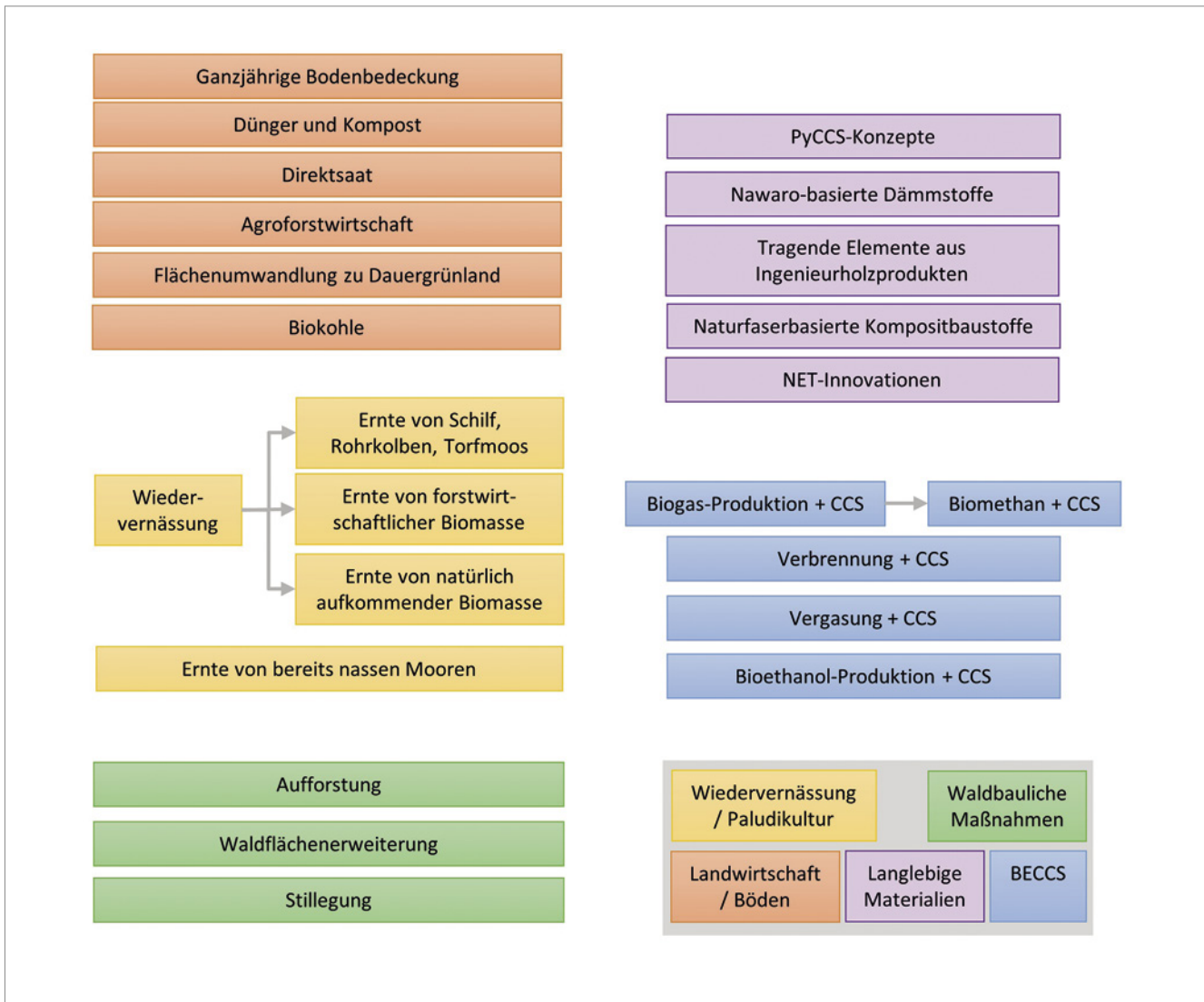


Abbildung 9 **Biobasierte Konzepte für negative Emissions-Technologien**
(Quelle: Projekt BioNET, UFZ)

► **Abbildung 9** zeigt zusammenfassend biobasierte negative Emissions-Technologien (NET)-Konzepte im Projekt BioNET (FKZ BMBF 01LS2107B). Einige dieser Konzepte können direkt mit der Wärmebereitstellung verbunden werden. Beispielsweise die Biomasse aus Paludikultur, Wald oder Landwirtschaft kann in Wärmetechnologien (z. B. durch Verbrennung) eingesetzt werden und mit CCS negative Emissionen erzeugen.

4. Zusammenfassung

Bioenergie hat einen hohen Anteil an der Wärmeversorgung, insbesondere bei Festbrennstoffen (Scheitholz und Pellets) im Gebäudesektor, vor allem als monovalente und grundlastorientierte Lösungen. Eine künftige Wärmeversorgung benötigt die smarte und systemdienliche Integration der Bioenergie. Die verschiedenen Szenarien zeigen, wie Biomasse mit weiteren Sektoren wie dem Strom- und Verkehrssektor zum Einsatz kommen. Durch neue Lösungsansätze kann Biomasse auch zukünftig ein intelligenter Baustein in der Wärmeversorgung sein. Vor allem bei der Biomasseaufbereitung von Rest- und Abfallstoffen, bei hybriden Wärmesystemen (z. B. als Spitzenbedarfsdeckung), als flexible Bioenergie zur Systemstabilisierung, zur stoffliche-energetischen Nutzung mit hoher stofflicher Wertschöpfung.

Referenzen

1. https://ag-energiebilanzen.de/wp-content/uploads/2020/10/ageb_20v_v1.pdf
2. Jordan, M., Millinger, M., Thrän, D., (2022): Benopt-Heat: An economic optimization model to identify robust bioenergy technologies for the German heat transition. *SoftwareX* 18, art. 101032
3. Millinger, M., Tafarte, P., Jordan, M., Hahn, A., Meisel, K., Thrän, D., (2021): Electrofuels from excess renewable electricity at high variable renewable shares: cost, greenhouse gas abatement, carbon use and competition. *Sustain. Energ. Fuels* 5 (3), 828–843
4. Interpreting long-term energy scenarios and the role of bioenergy in Germany – ScienceDirect
5. The crucial role of biomass-based heat in a climate-friendly Germany—A scenario analysis – ScienceDirect
6. Khalsa et al: Foliage and Grass as Fuel Pellets: Small Scale Combustion of Washed and Mechanically Leached Biomass *Energies* 2016, 9, 361. <https://doi.org/doi:10.3390/en9050361>
7. Agelidou, E.; Seliger-Ost, H.; Henke, M.; Dreißigacker, V.; Krummrein, T.; Kutne, P. The Heat-Storing Micro Gas Turbine—Process Analysis and Experimental Investigation of Effects on Combustion. *Energies* 2022, 15, 6289. <https://doi.org/10.3390/en15176289>
8. IZES (2020): Kurzuntersuchung zur Abschätzung der Dimension des Austauschs von Ölheizungen sowie der möglichen Auswirkungen alternativer Heizungssysteme im Besonderen auf die Luftqualität im städtischen und ländlichen Raum. Kurzstudie im Auftrag von My Energy G.I.E., Luxemburg und Saarbrücken

Industrielle Prozesswärme im Kontext eines treibhausgasneutralen Energiesystems



FZ Jülich
Felix Kullmann
f.kullmann@fz-juelich.de

DBFZ
Lilli Sophia Röder
lilli.sophia.roeder@dbfz.de

DLR
Dr. Peter Kutne
peter.kutne@dlr.de

Wuppertal Institut
Dr. Georg Holtz
georg.holtz@wupperinst.org

Clemens Schneider
clemens.schneider@wupperinst.org

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

Im Rahmen einer aktuellen Studie zur Transformation des Europäischen Energiesystems zur Klimaneutralität unter Berücksichtigung der Gaskrise entwickelte das Wuppertal Institut ein Szenario (EU27+UK) für die Transformation der europäischen Industrie inklusive Raffinerien und Kokereien, in dem die industriellen Treibhausgasemissionen bis zum Jahr 2050 um 99% gegenüber 2018 gemindert werden. Der Endenergiebedarf der Industrie sinkt in diesem Szenario durch den Einsatz von Wärmepumpen, andere Energieeffizienzmaßnahmen sowie einen Rückgang der Produktion in Raffinerien bis 2040 deutlich und der Bedarf an fossilen Gasen kann zeitnah gemindert und bis 2045 auf nahezu Null gesenkt werden (► *Abbildung 1*).

Im Rahmen dieses Szenarios erfolgte auch eine detaillierte Abbildung der Entwicklung der Prozesswärmebereitstellung in Deutschland. Die Bereitstellung von Niedertemperaturwärme (< 150 °C) erfolgt im Szenario größtenteils über Wärmepumpen und Fernwärme. Solar- und Geothermie spielen eine (kleinere) Rolle. Für die Dampfbereitstellung (150–500 °C) werden vielfach hybride Strom/H₂-Kessel eingesetzt, daneben Biomasse. In der Chemieindustrie spielen auch langfristig Reststoffe aus Steamcrackern eine wichtige Rolle.

Die Bereitstellung von Hochtemperaturwärme erfolgt prozessspezifisch je nach den technischen Gegebenheiten der Prozesse (z. B. H₂ in den Direktreduktionsanlagen und Biomasse in den Walzwerken der Stahlindustrie, abfallbasierte Brennstoffe v. a. in den Klinkeröfen der Zementindustrie, Biomethan und Strom in der Glasindustrie, Strom für Primär- und Sekundäraluminium). Biogene Energieträger in Kombination mit CCS (BECCS) ermöglichen in der Stahlindustrie und in der mineralischen Industrie die Bereitstellung von Hochtemperaturwärme und gleichzeitig negative Emissionen zur Kompensation von Restemissionen.

Auch am Forschungszentrum Jülich wird mithilfe von Energiesystemmodellen analysiert, wie Deutschland bis 2045 Treibhausneutralität erreichen kann. In einer aktuellen Studie zeigt sich, dass gerade im Industriesektor eine tiefgreifende Transformation stattfinden muss. Der derzeit überwiegend auf

fossilen Ressourcen basierende Energieverbrauch muss auf die zunehmende Verwendung von Wasserstoff, Bioenergie und erneuerbarem Strom umgestellt werden. Insbesondere Wasserstoff und der Einsatz von Biomasse spielen für die zukünftige Prozesswärmebereitstellung eine entscheidende Rolle. In der Stahlindustrie werden im Jahr 2045 ca. 86 TWh Wasserstoff in der Wasserstoff-Direktreduktion eingesetzt (► *Abbildung 2*).

Biomasse kommt als erneuerbarer Energieträger zukünftig ebenfalls eine entscheidende Rolle bei der treibhausgasneutralen Prozesswärmebereitstellung zu. Annähernd 200 TWh Biokohle aus torrefizierter holzartiger Biomasse werden im Jahr 2045 in Industrieöfen zur Prozesswärmeerzeugung eingesetzt.

Eine weitere Möglichkeit die zukünftige Prozesswärmeerzeugung umzustellen, bzw. den Bedarf zu senken, besteht in der Nutzung von Abwärmepotenzialen. Am ZAE Bayern sind dazu Analysen durchgeführt worden, um sowohl das gesicherte nationale Abwärmepotenzial in Deutschland abzuschätzen als auch dessen technische und wirtschaftliche Nutzung zu beschreiben. (► *Abbildung 3*)

Die Analysen kommen zu dem Schluss, dass zum einen das jährliche Abwärmepotenzial auf ca. 40 PJ/a begrenzt ist und zum anderen 95% der Abwärme aus lediglich 784 Betrieben stammt. Eine Nutzbarmachung ist daher sehr stark von den regionalen Gegebenheiten abhängig und nicht für jede Branche sinnvoll. Ohne die Möglichkeit Abwärme zu nutzen, kommt der Integration von erneuerbaren Energien in bestehende Industrieprozesse eine noch bedeutendere Rolle zu.

Als großer Bestandteil der Integration erneuerbarer Energien spielt die elektrische Erzeugung von Wärme (Prozess- und Raumwärme sowie Warmwasser) eine entscheidende Rolle. Eine Methodik zur Abschätzung über die guten Elektrifizierungsmöglichkeiten thermischer Prozesse wurde 2017 durch Gruber [3] vorgestellt. Die Methodik wurde bereits für einige Prozesse angewandt und ein hohes Potenzial in der Zement-, Zucker- und Papierindustrie festgestellt.

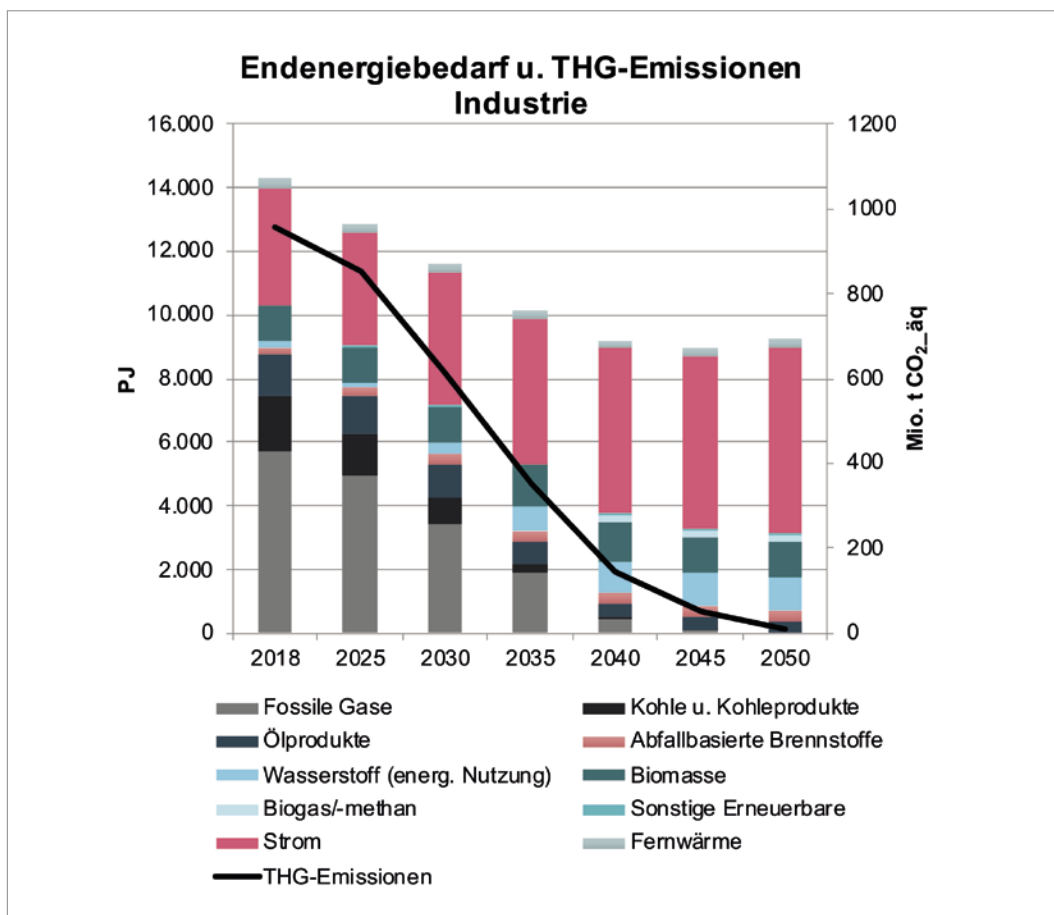


Abbildung 1
 Entwicklung des Endenergiebedarfs und der Treibhausgasemissionen bis 2050 in der EU
 (Quelle: Wuppertal Institut)

Das DBFZ forscht aktuell daran die Biokraftstoffproduktion noch umweltfreundlicher zu gestalten und somit die elektrische Erzeugung von Prozesswärme zu erproben. Das niedrige Temperaturniveau in vielen thermischen Biokraftstoff-Prozessen lässt auf eine gute Elektrifizierbarkeit schließen. Dadurch kann der wertvolle, produzierte Biokraftstoff für temperaturintensivere Zwecke genutzt werden und der interne Prozessenergiebedarf dennoch umweltfreundlich bereitgestellt werden (► *Abbildung 4*).

Die European Biogas Association (EBA) plant 5.000 neue Biomethanerzeugungsanlagen bis 2030 und will zusätzlich so viele existierende Biogasanlagen wie möglich auf Biomethanerzeugung aufwerten. Das bedeutet, dass der Wärmebedarf hier noch enorm steigen wird, da die existierenden Biogasanlagen, welche aktuell Strom mit BHKWs erzeugen (und die Abwärme daraus nutzen können), nun auf CO₂-Abtrennung und Biomethanerzeugung umrüsten werden.

Auffällig war bei der Untersuchung des Wärmebedarfs von Biokraftstoffen, dass vor allem für die anaerobe Vergärung in der Biomethanproduktion sehr viel Wärme benötigt wird. Zwar ist das Temperaturniveau niedrig, aber es müssen große Mengen Biomasse mit hohem Feuchtegehalt erhitzt werden, um verhältnismäßig "wenig" Biomethan zu erzeugen. Diese hohen Wärmemengen sind besonders interessant für Elektrifizierung da man mit Wärmepumpen einfach die benötigten Temperaturen (ca. 40 °C) erzeugen kann. Dies betrifft nicht die ca. 10.000 Biogasanlagen in Deutschland, da diese meist ein Blockheizkraftwerk (BHKW) vor Ort haben und dessen Abwärme nutzen können, um den Fermenter zu beheizen.

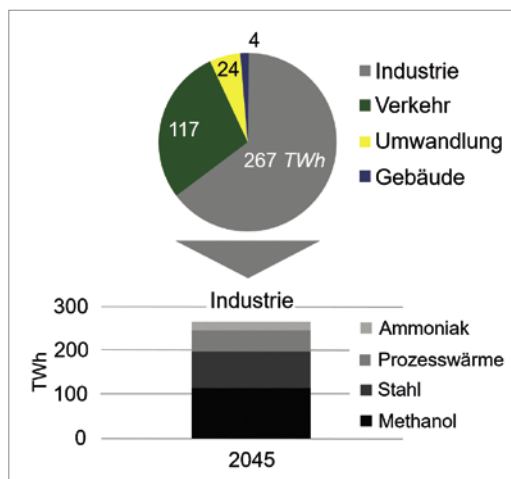
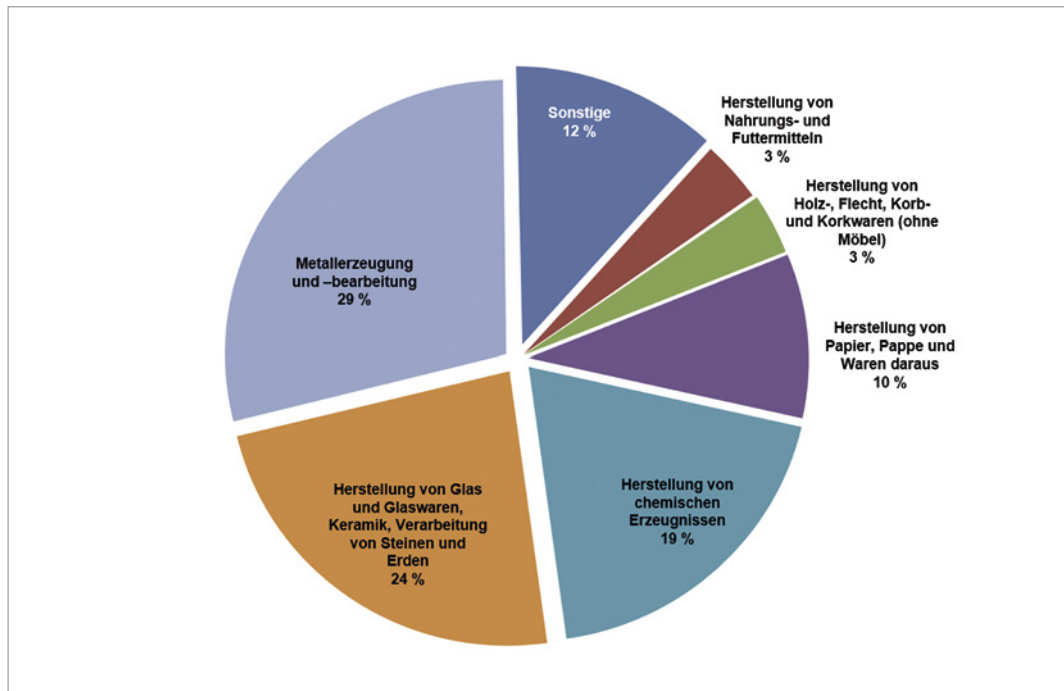


Abbildung 2
 Industrieller Wasserstoffbedarf in Deutschland in 2045
 (Quelle: FZJ [1])

Abbildung 3
**Sektorale Aufteilung
 des deutschen
 Abwärmepotenzials
 in 2016**
 (Quelle: ZAE Bayern [2])

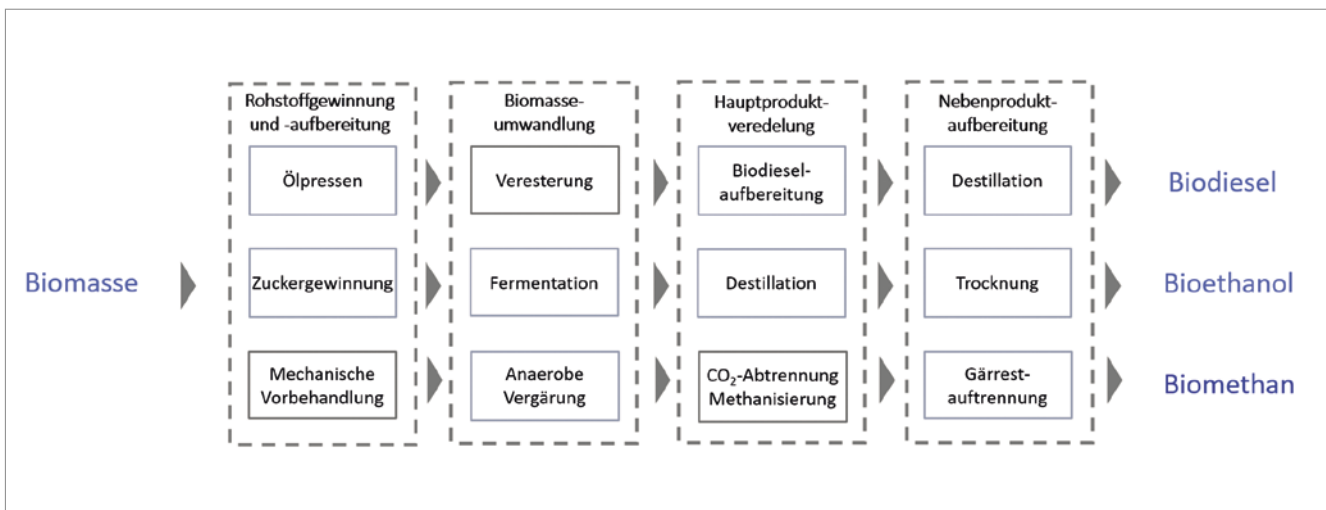


Neben der Integration von Strom aus regenerativen Quellen ist auch, wie in den anfangs beschriebenen Energieszenarien, die Integration von erneuerbaren Energieträgern in bereits existierende Industrieprozesse notwendig. Industriebrenner zur Prozesswärmeerzeugung nutzen heute elektrische Gebläse, um die Luft dem Brenner zuzuführen. Dies führt zu einem erheblichen Strombedarf. Durch die Kopplung einer Mikrogasturbine mit einem Abgasbrenner übernimmt eine mit erneuerbaren Brennstoffen betriebene Gasturbine die Rolle des Gebläses, wodurch der Strombedarf entfällt, zusätzlicher Strom effizient erzeugt wird und die Abwärme direkt genutzt werden kann. Das Abgas der Gasturbine hat einen so hohen Restsauerstoffgehalt, dass es in einem weiteren Brenner für die Prozesswärmeerzeugung

genutzt werden kann. Die erhöhte Abgastemperatur am Eintritt des Abgasbrenners reduziert die Abgasemissionen und erhöht erheblich die Brennstoffflexibilität des Gesamtsystems. Dadurch können an dieser Stelle neben Wasserstoff und Biogas flexibel auch Restgase und Schwachgase eingesetzt werden.

Nicht nur die Integration von erneuerbaren Energieträgern, sondern auch die Integration von fluktuierenden Wärmeströmen spielt für das zukünftige treibhausgasneutrale Energiesystem eine entscheidende Rolle. Die Nutzung von zeitlich und im Temperaturniveau fluktuierenden Hochtemperaturwärmequellen (konzentrierte Solarthermie, Prozessabwärme) wird dadurch geschmälert, dass industrielle Prozesse typischerweise eine dauerhaft zur

Abbildung 4
**Hauptschritte der
 Biokraftstoffproduktion**
 (Quelle: DBFZ)



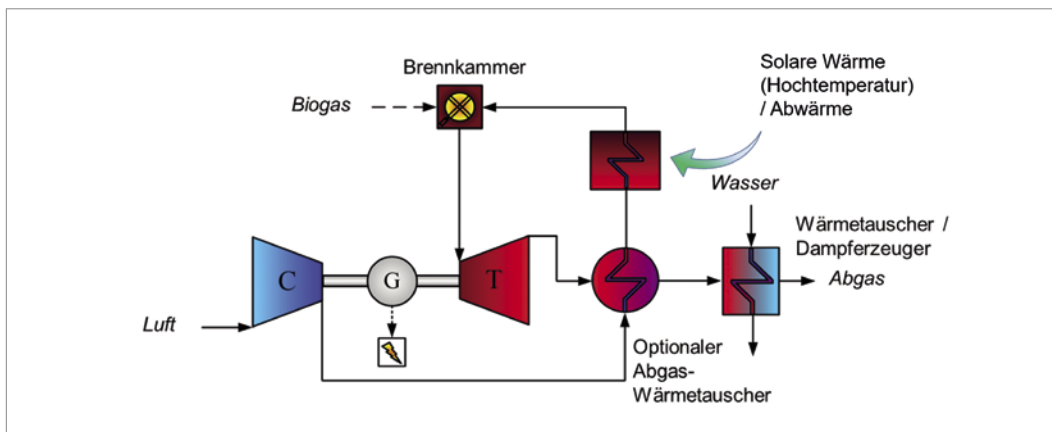


Abbildung 5

Integration von fluktuierenden Wärmequellen in Gasturbinenkreislauf

(Quelle: DLR)

Verfügung stehende Wärmemenge auf einem konstanten Temperaturniveau benötigen. Die Integration dieser Wärmequellen in einen Gasturbinenkreislauf ermöglicht die maximale Nutzung dieser Energiequellen, bei gleichzeitiger Gewährleistung der Verfügbarkeit. Die erneuerbare Wärme wird dazu genutzt, die Luft nach dem Kompressor der Gasturbine von ca. 300 °C an aufzuheizen. Es kommen also Wärmequellen in Frage, die oberhalb dieses Temperaturniveaus liegen (► *Abbildung 5*).

Der darüber hinaus notwendige Wärmebedarf wird durch die Verbrennung von regenerativem Brennstoff in der Brennkammer erzeugt. Dabei reduziert die zugeführte Wärme die notwendige Brennstoffmenge und kann so optimal genutzt werden. Aktueller Gegenstand der Forschung ist unter anderem die Brennkammer der Gasturbine, die unter sehr unterschiedlichen Bedingungen zuverlässig und schadstoffarm funktionieren muss. Weiterhin werden Wärmetauscher-Konzepte für unterschiedliche Wärmequellen entwickelt.

Literatur

- [1] Stolten et al. (2022) Neue Ziele auf alten Wegen? Strategien für eine treibhausgasneutrale Energieversorgung bis zum Jahr 2045. Forschungszentrum Jülich, Reihe Energie & Umwelt Band 577, ISBN 978-3-95806-627-4
- [2] Sarah Brückner (2016) Industrielle Abwärme in Deutschland – Bestimmung von gesichertem Aufkommen und technischer bzw. wirtschaftlicher Nutzbarkeit. Dissertation. Technische Universität München
- [3] Anna-Maria Gruber (2017) Zeitlich und regional aufgelöstes industrielles Lastflexibilisierungspotenzial als Beitrag zur Integration Erneuerbarer Energien. Dissertation. Technische Universität München.

Prozesswärme mit konzentrierender Solarthermie und Hochtemperatur-Wärmepumpen

Wie kann die Kombination der Technologien zu einer vollständigen Dekarbonisierung industrieller Wärmeversorgung bis 300 °C beitragen?



DLR
Dr. Panagiotis Stathopoulos
panagiotis.stathopoulos@dlr.de

Dirk Krüger
dirk.krueger@dlr.de

Fraunhofer ISE
Dr. Peter Nitz
peter.nitz@ise.fraunhofer.de

KIT
Prof. Dr. Robert Stieglitz
robert.stieglitz@kit.edu

Die Industrie war 2020 der Sektor mit den zweitgrößten Treibhausemissionen nach dem Energiesektor und vor dem Verkehrssektor. [1] Die emittierten 178 Mio. Tonnen CO_{2eq} entsprechen etwa den gesamten Emissionen der Schweiz und Österreichs. Gleichzeitig hatte die Industrie den zweitgrößten Endenergieverbrauch mit 657TWh. [2] Rund 510 Terawattstunden (TWh) davon sind der Bereitstellung von Industriewärme zuzurechnen. Diese Wärme wird auf unterschiedlichen Temperaturniveaus bereitgestellt – ungefähr 35% für Wärme unter 300°C. Der vorliegende Vortrag konzentriert sich auf drei Optionen zur Dekarbonisierung von Prozesswärme bei Temperaturen unter 300°C. Diese Optionen sind:

1. konzentrierende Solarthermie (CST: Concentrating Solar Thermal)
2. industrielle Wärmepumpen
3. Kombination beider Optionen

Der Vortrag analysiert das Thema mithilfe der drei folgenden Leitfragen:

- Kann CSP industrielle Standorte in Deutschland zuverlässig mit Wärme versorgen?
- Welchen Beitrag zur industriellen Dekarbonisierung können Wärmepumpen leisten?
- Wo liegen die größten technischen und ökonomischen Hürden beider Technologien und wie kann ihre Kombination einen weiteren Beitrag leisten?

Kann CST industrielle Standorte in Deutschland zuverlässig mit Wärme versorgen?

Produktionsanlagen müssen kontinuierlich und unabhängig von den Wetterbedingungen mit Wärme versorgt werden. Gleichzeitig sind sie so optimiert, dass sie möglichst wenig Platz benötigen. Das führt dazu, dass die benötigte Wärmeleistung und Wärmeenergie pro Standort im Vergleich zur verfügbaren solaren Lichteinstrahlung [3] hoch ist (► *Abbildung 1*).

Dazu kommt die zeitliche Variabilität der solaren Quelle. Aus diesen Gründen ist eine kontinuierliche und vollständige Wärmeversorgung eines Industriestandortes nur mit Solarthermie nicht realistisch. Trotzdem, ist es sehr sinnvoll, den Wärmebedarf soweit wie möglich durch Solarthermie kostengünstig und klimaneutral abzudecken. Solarwärme, insbesondere aus Parabolrinnenkollektoren, kann auch in Mitteleuropa bis ca. 400°C bereitgestellt werden. Wird Solarthermie mit entsprechenden Wärmespeichersystemen kombiniert, ist ein Kapazitätsfaktor/Deckungsgrad von über 30% realistisch. Wird Solarthermie mit anderen Wärmequellen (Geothermie, industrielle Abwärme) kombiniert, sind solare Deckungsgrade von 50% realistisch.

Welchen Beitrag zur industriellen Dekarbonisierung können Wärmepumpen leisten?

Industrielle Wärmepumpen können eine doppelte Rolle erfüllen:

Einerseits können sie den Primärenergiebedarf der Industrie durch die Aufwertung von Abwärme drastisch reduzieren. Für jede Einheit verbrauchten Strom (Primärenergie) erzeugen sie 2–3 Einheiten Wärme. Gleichzeitig elektrifizieren sie den Wärmebedarf und somit können Sie als „enabling technology“ zur Dekarbonisierung der Wärmeversorgung beitragen. Momentan sind industrielle Wärmepumpen für die Wärmebereitstellung bis ca. 140–150°C kommerziell verfügbar. IEA Annex 48 hat ca. 152 Anwendungsfälle europaweit dokumentiert [4]. Trotzdem bleibt das Potenzial von industriellen Wärmepumpen zur Versorgung von Wärme bis 250°C sehr hoch. Marina et.al [5] haben abgeschätzt, dass der Einsatz von Wärmepumpen zur Wärmebereitstellung bis 200°C eine kumulierte Heizleistung von 23,0GW in der EU28 erreichen könnte, bestehend aus 4174 Wärmepumpen, die 641 PJ/a Prozesswärmebedarf decken können. Ungefähr 50% dieser Wärmepumpen werden Heizleistungen < 10MW haben.

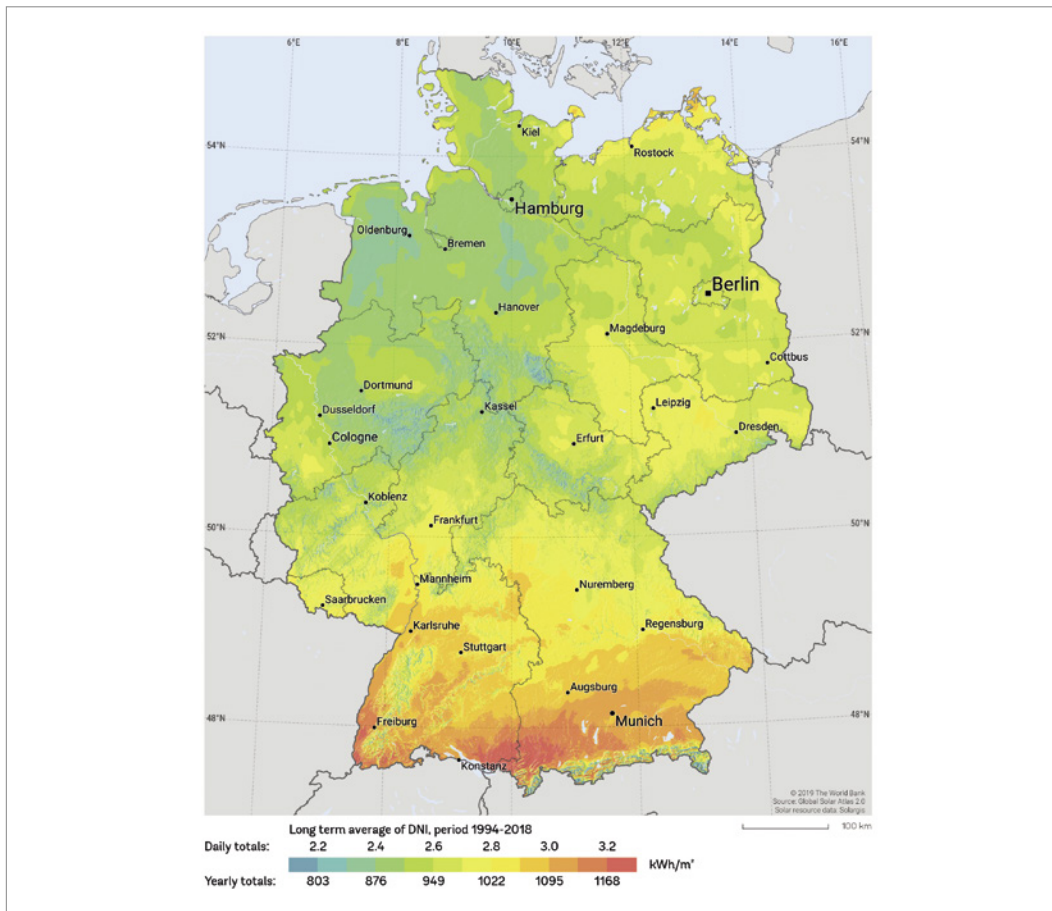


Abbildung 1

Solareinstrahlung in Deutschland

(Quelle: Solargis.com)

Wo liegen die größten technischen und ökonomischen Hürden beider Technologien?

Bis dato hat es keine der beiden Technologien geschafft fossile Primärenergieträgern in der Industrie zu ersetzen, was aber bei beiden Technologien unterschiedliche Gründe hat:

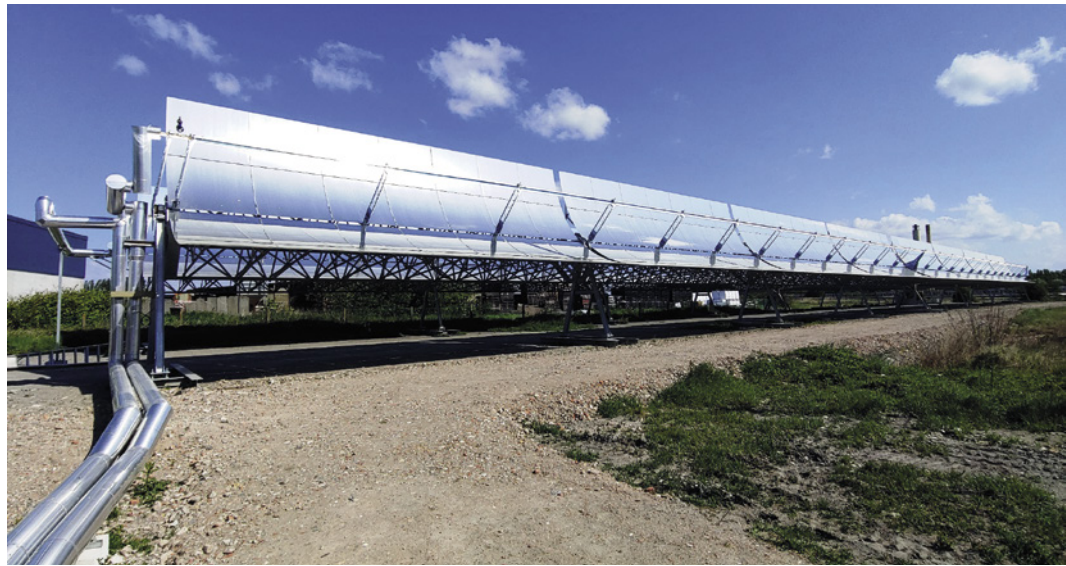
Im Fall von CST sind Investitionen in solche Systeme auch in Mitteleuropa sehr lukrativ. Abhängig vom Erdgaspreis können diese Investitionen in Parabolrinnenkollektoren in einem Zeitraum von 2–6 Jahren, amortisiert werden. Dazu ist ihr Beitrag zur Wärmeversorgung CO₂-neutral.

Hier sind vor allem folgende Gründe für den limitierten Einsatz zu benennen: Einerseits ist die Energiedichte dieser Quelle sehr gering. Aus diesem Grund wird viel Aufstellfläche benötigt, die oft nicht vorhanden ist. Darüber hinaus variiert die Wärmeerzeugung von CST-Systemen sowohl im Tagesablauf als auch saisonal. Das führt dazu, dass sie entweder durch den Einsatz eines fossilen Brennstoffs oder durch die Installation von Mitteltemperaturspeichern unterstützt werden müssen. Vor allem ist die Technologie aber wenig bekannt und wurde bis vor kurzem

noch als nicht geeignet für den mitteleuropäischen Raum angesehen. Zudem beherrschen Planungsbüros die Planung dieser Technologie und die entsprechend kaum bekannten Planungstools meist noch nicht. Es gibt kaum kommerzielle Projekte, erste Referenzanlagen werden für Deutschland für 2023 erwartet.

Der Einsatz auch der kommerziell verfügbaren industriellen Wärmepumpen wurde bis dato primär durch die sehr hohen Strompreise im Vergleich zu den Erdgaspreisen verhindert. Dazu ist die Integration von solchen Systemen in existierenden Produktionsprozessen sehr aufwändig und kostspielig. Diese zwei Faktoren haben ebenfalls dazu geführt, dass kaum Technologien für höhere Liefertemperaturen entwickelt wurden. Ein weiterer Begrenzungsfaktor für den Einsatz von industriellen Wärmepumpen ist die begrenzte Verfügbarkeit von nutzbarer Abwärme. Sehr häufig fällt diese Abwärme in unterschiedlichen Teilprozessen an. Dazu ist die entsprechende Abwärmtemperatur zu tief und dadurch der Temperaturhub der Wärmepumpe zu hoch. Das führt zu tiefen Leistungszahlen und schlechterer Wirtschaftlichkeit der Ingestion (► *Abbildung 3*).

Abbildung 2
**Parabolrinnenkollektor,
 Oostende**
 (Foto: Solarlite)



Wie kann die Kombination von CST und HTWP einen weiteren Beitrag leisten?

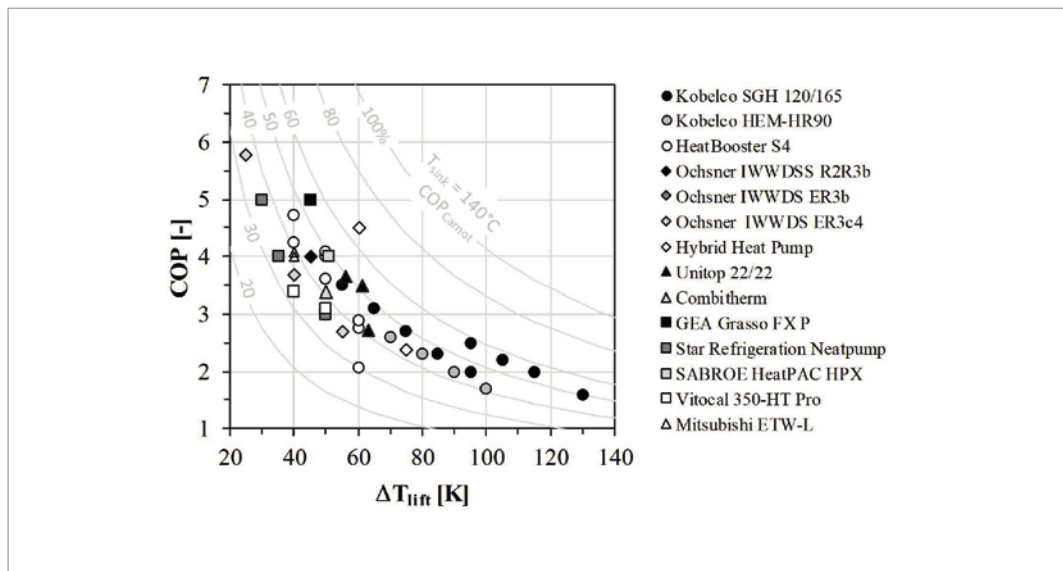
Abgesehen von den aktuellen Entwicklungen im Gas- und Strommarkt, ist eine Dekarbonisierung der industriellen Wärmeversorgung auf dem Weg zur Klimaneutralität unabdingbar. Nach den aktuellen Entscheidungen der Bundesregierung in Deutschland, wird der CO₂-Preis als das Hauptinstrument gesehen, um Preissignale zu Gunsten von CO₂-neutralen Energieträgern zu erzeugen und das Preisverhältnis zwischen Strom und Gas (bzw. fossilen Primärenergieträgern) zu beeinflussen. Es ist also absehbar, dass dieses Verhältnis früher oder später günstiger für den Einsatz von Wärmepumpen wird. Das ist bereits seit vielen Jahren der Fall in skandinavischen Ländern. Das wird nur eine Hürde zum Einsatz von Wärmepumpen bzw. CST beheben.

Die immer weitere Verbreitung beider Technologien wird ebenfalls die Entwicklung der benötigten Infrastruktur (Fachpersonal zur Wartung und Installation usw.) und die noch am Anfang stehende Kostensenkung fördern.

Parallel zu diesen Entwicklungen wird die Industrie nach und nach Energieeinsparungsmaßnahmen durchführen, die häufig zu weniger Abwärme und tieferen Abwärmepertemperaturen führen. Das wird den Einsatz von industriellen Wärmepumpen für Senktemperaturen über 150 °C weiterhin erschweren, da die entsprechenden möglichen Leistungszahlen niedriger werden.

Es ist also sinnvoll, über Kaskadensysteme nachzudenken, die Abwärme erst einmal durch Solarwärme aufwerten. Solange die Solarwärme die benötigte Temperatur liefern kann, und den übergeordneten

Abbildung 3
**Leistungszahl
 kommerzieller
 industrieller WP
 mit einer
 Senktemperatur
 von 140 °C als
 eine Funktion des
 Temperaturhubes**
 (Quelle: [6])



Industrieprozess versorgen kann, ist CST das einzige System im Betrieb. Ist die Sonneneinstrahlung geringer, wird die Abwärme zuerst durch Solarwärme auf ein mittleres Temperaturniveau gehoben (z. B. 120°C) und dort gespeichert. Eine Wärmepumpe kann Wärme aus diesem Speicher nachfolgend auf das benötigte Temperaturniveau heben. Benutzt die Wärmepumpe erneuerbaren Strom, kann dieses System eine vollständige und zuverlässige Dekarbonisierung der Wärmeversorgung des entsprechenden Prozesses erreichen. Somit kann man einerseits die begrenzte Verfügbarkeit der Solarwärme durch eine entsprechende Überdimensionierung des Speichers und des CST adressieren und durch die Wärmepumpe begrenzen (die WP hat eine hohe Leistungszahl). Gleichzeitig kann man eine solche tiefe Dekarbonisierung auch für Industrieprozesse liefern, die wenig Abwärme bei tiefen bis moderaten Temperaturen haben.

Referenzen

- [1] <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Infografiken/Industrie/treibhausgasemissionen-deutschland-nach-sektoren.html>
- [2] <https://www.umweltbundesamt.de/daten/energie/energieverbrauch-nach-energietraeger-sektoren#allgemeine-entwicklung-und-einflussfaktoren>
- [3] <https://solargis.com/>
- [4] <https://waermepumpe-izw.de/karte-europa>
- [5] <https://publications.tno.nl/publication/34637767/MueE3v/marina-2021-estimation.pdf>
- [6] <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360544218305759>

Neuartige Katalysatoren für nachhaltige, wärmeintensive Industrieprozesse



HZB
Dr. Steffi Hlawenka
steffi.hlawenka
@helmholtz-berlin.de

DBFZ
Prof. Dr. Ingo Hartmann
ingo.hartmann@dbfz.de

Eine Welt ohne Papier, Glas, Düngemittel, Beton, Stahl, Keramiken und Kunststoffe ist für den Großteil der Menschheit heutzutage nicht mehr vorstellbar. Diese Materialien sind Bausteine unserer modernen Gesellschaft, ihre Herstellung jedoch ist sehr energieaufwändig.

Energieintensive Industrieprozesse benötigen zwei verschiedene Arten von Energie:

- elektrische Energie, z. B. zum Antrieb von Anlagen
- thermische Energie, um Produktumwandlungen mittels Erhitzen, Trocknen, Schmelzen, Kalzinieren sowie thermochemische Umwandlungen zu ermöglichen

Diese grundlegenden Vorgänge werden bislang hauptsächlich durch Anlagen realisiert, die Energie aus einer Vielzahl von fossilen Brennstoffquellen wie Erdgas, Flüssiggas oder Kohle nutzen. Konventionelle brennstoffbasierte Prozesse ermöglichen es, Wärmeenergie durch Verbrennung von Feststoffen, Flüssigkeiten oder Gasen zu erzeugen und direkt oder indirekt auf das verarbeitete Material zu übertragen. Die durch diese Aktivitäten erzeugten Treibhausgase machen ein Viertel der weltweiten Emissionen aus, ohne indirekte Emissionen aus Strom, der für industrielle Prozesse verwendet wird [1].

Hinsichtlich der Transformation zu einem nachhaltigen Energiesystem stand der Fokus in den vergangenen Jahrzehnten hauptsächlich auf der Defossilisierung des Stromsektors durch die Erforschung und den Ausbau von erneuerbaren Energiequellen, wie Photovoltaik- und Windkraftanlagen.

Das Potenzial der Transformation des Wärmesektors ist allerdings enorm, denn laut Internationaler Energieagentur entfällt etwa die Hälfte des globalen Energiekonsums auf die Bereitstellung von Wärme [1]. Die Hälfte hiervon wiederum, also 25% des globalen Energiebedarfs, wird für die Versorgung der Industrie mit Prozesswärme benötigt.

Ein detaillierter Blick auf die Temperaturverteilung innerhalb des Wärmebedarfs legt offen, dass je die Hälfte für Prozesse bei hohen Temperaturen (höher als 400 °C), bzw. mittleren und niedrigen Temperaturen (150–400 °C) verwendet wird. (► *Abbildung 1*)

Wie können energieintensive Industrieprozesse nachhaltig betrieben werden?

Für eine erfolgreiche Wärmewende werden Technologien benötigt, die einen fließenden Übergang von der fossilbasierten Industrieheizung zu elektrisch basierten Power-to-Heat-Prozessen ermöglichen, basierend auf der Nutzung von erneuerbar hergestelltem Strom. Der massive Ausbau erneuerbarer Energiequellen (vor allem aus Sonne und Wind), Smart-Grid-Technologien sowie die Entwicklung eines globalen Handels- und Verteilungssystems für erneuerbare Energien sind für einen erfolgreichen Übergang dringend erforderlich.

Hinsichtlich der Elektrizität-zu-Wärme-Technologien sind vor allem die industriellen Hochtemperaturprozesse sehr herausfordernd. Bis zu einem Wärmebedarf von etwa 350 °C sind elektrische Alternativen zu konventionellen Anlagen auf dem Markt vorhanden (► *Abbildung 2*). Elektroheizer, die industrielle Wärme bis zu etwa 350 °C erzeugen können, sind weit verbreitet. Auch Elektroöfen für den industriellen Wärmebedarf bis ca. 1.000 °C sind technisch realisierbar, jedoch noch nicht für alle Anwendungen kommerziell verfügbar.

Rein technologisch betrachtet wird erwartet, dass es möglich ist, die Hälfte des industriellen fossilen Brennstoffbedarfs zu elektrifizieren [3].

Die Elektrifizierung der Industrie über strombasierte Heiztechnologien bedeutet, dass mindestens die Hälfte des globalen Energiebedarfs in Form von nachhaltig erzeugtem Strom benötigt wird. Das ist mehr als doppelt so viel, als es unserem heutigen reinen Strombedarf entspricht.

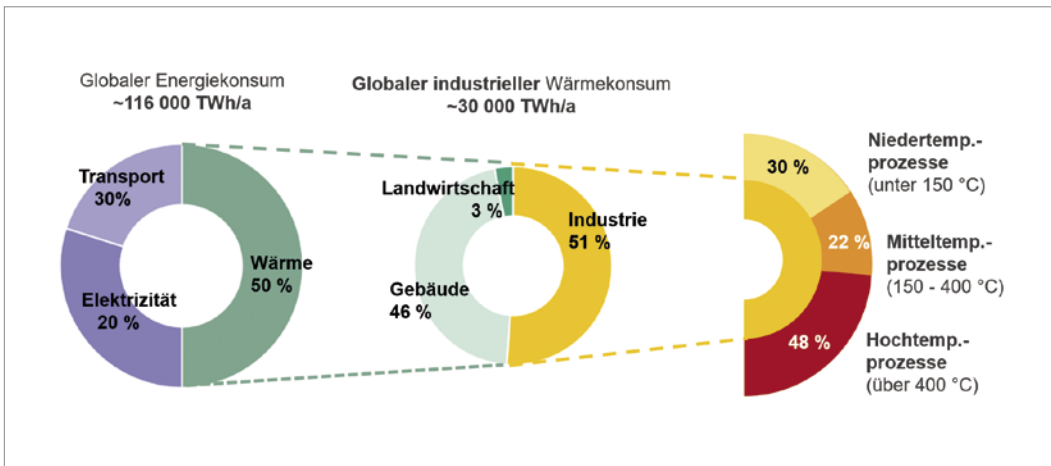


Abbildung 1
Anteil der Hochtemperaturprozesse am weltweiten Energiekonsum
 Auf Grundlage der IEA World Energy Balances Highlights 2021 [1].
 (Quelle: HZB)

Aufgrund ihrer großen regionalen und zeitlichen Volatilität, muss der massive Ausbau erneuerbarer Energien intelligent mit Speicher- und Transportlösungen im globalen Maßstab einhergehen. Diese Dimension kann nach derzeitigem Stand der Technik nur durch chemische Energieumwandlung erreicht werden, welche als zentrales Element die Wandlung von Strom zu Wasserstoff besitzt [4]. Eine globale Industrie und Wirtschaft, die von erneuerbaren Energien angetrieben wird, wird somit auf die Nachhaltigkeit in Produktion, Transport und Handel mit wasserstoffbasierten synthetisierten Chemikalien und Kraftstoffen angewiesen sein.

Gleichzeitig nimmt Biomasse, als speicherfähiger und jederzeit abrufbarer Energieträger, hierbei eine wichtige Stellung als eine maßgeschneiderte Ergänzung zu Wind- und Sonnenenergie ein.

Warum sind Katalysatoren für nachhaltige wärmeintensive Industrieprozesse nötig?

Um elektrische Energie aus nachhaltigen Quellen wie Sonne und Wind in chemischen Bindungen, zum Beispiel von wasserstoffbasierten Kraftstoffen zu speichern, sind zwingend Katalysatoren erforderlich. Auch bei der Verbrennung von Biomasse, als Puffermedium um die Volatilität erneuerbarer Energiequellen abzdämpfen, werden Katalysatoren benötigt, um z.B. die entstehenden Emissionen von Methan, einem noch schädlicherem Treibhausgas als CO₂, zu verringern.

Abbildung 2
Erneuerbare Wärmequellen und die mit ihnen erzielbaren Temperaturen [2]
 (Quelle: DLR)

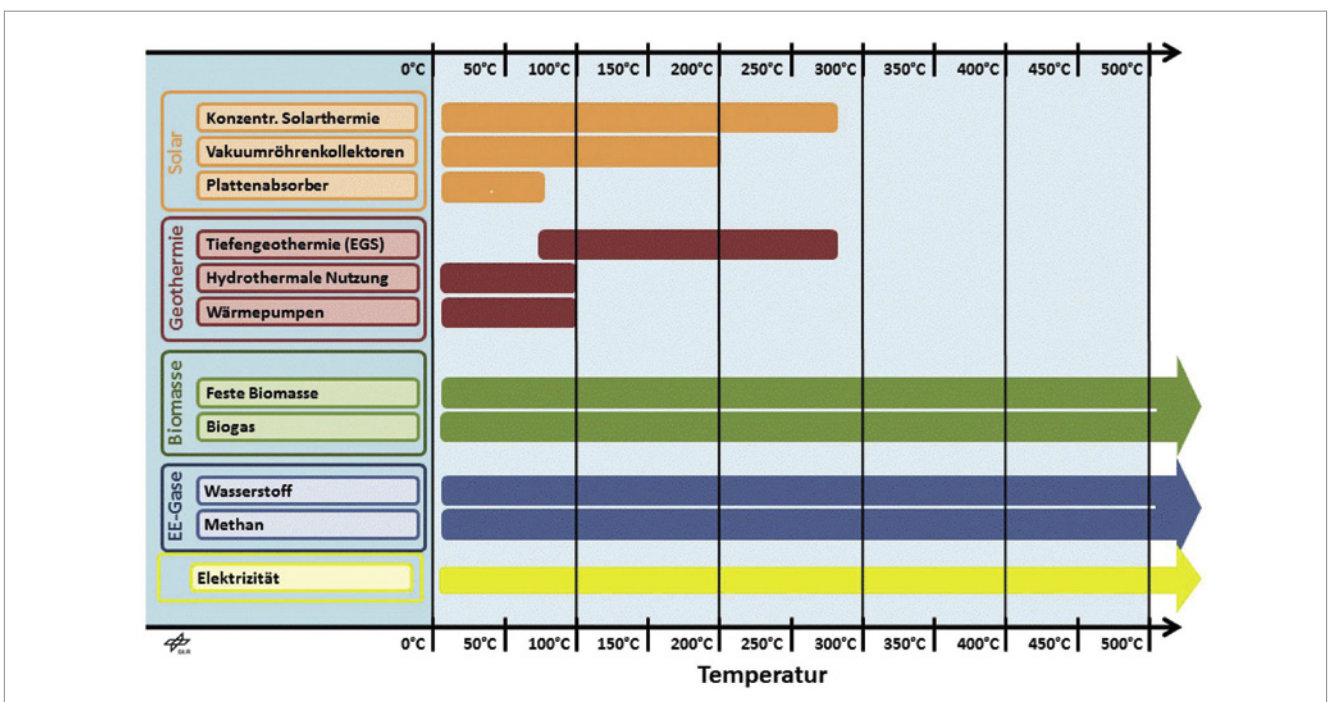
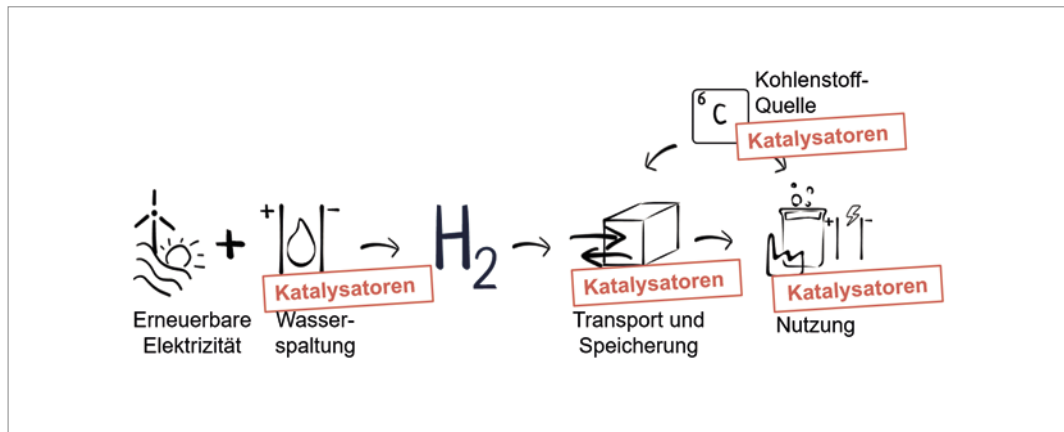


Abbildung 3

Rolle von Katalysatoren:

Vereinfachte Wertschöpfungskette von Wasserstoff und wasserstoffhaltigen Kraftstoffen zum Transport und zur Speicherung von freier elektrischer Energie aus erneuerbaren Quellen

(Quelle: HZB)



Warum sind konventionelle Katalysatoren unzureichend?

Konventionelle Katalysatoren sind zu Pellets gepresstes Pulver und basieren fast ausschließlich auf teuren und seltenen Materialien, wie Platin oder Palladium, oder teuren Trägersubstraten. Für die chemische Umsetzung werden Reaktoren, die durch Verbrennung fossiler Brennstoffe beheizt werden, verwendet. Katalysatoren senken die für bestimmte Reaktionen benötigte Energie, indem sie bestimmte Oberflächen als Reaktionsorte anbieten. Wie diese Wechselwirkungen von Reaktanden mit dem Katalysator genau funktionieren, ist bisher noch größtenteils unverstanden und das fehlende Wissen macht eine gezielte Anpassung und Optimierung an die jeweilige Reaktion sehr schwer bis unmöglich.

Wie sehen alternative katalytische Systeme aus?

Katalysatoren für die Totaloxidation von Methan in Abgasen sind bisher nicht verfügbar. Die bekannten Systeme verlieren nach kurzer Betriebszeit von wenigen Wochen die Aktivität. Desaktivierung durch thermische und chemische Vorgänge verlaufen schnell [5]. Im Falle der katalytischen Umsetzung von Methan aus Abgas der Verbrennung von Biomasse können katalytisch aktive Materialien konventionell auf porösem Glas (Controlled Porous Glass) genutzt werden [6]. Dieses Material weist einen hohen Energieaufwand bei der Herstellung auf, verursacht hohe Treibhausgas-Emissionen und ist sehr teuer. Eine Alternative stellt biogenes Silica, ein festes Verbrennungsprodukt biogener Rohstoffe wie Getreidespelzen, dar. Dieses ist günstiger in der Herstellung als das industrielle Basisprodukt. Grundlegende Untersuchungen zeigen bereits gute und vergleichbare Aktivität beider Systeme [7]. Da das Silica aus biogener Quelle über die Verbrennung von siliziumreichen biogenen Reststoffen gewonnen wird [8] und dabei Wärme erzeugt wird, kann bei einer wärmegeführten Herstellung die Wärme für Prozess- oder Heizanwendungen genutzt werden.

Abbildung 4

Schematische Abbildung eines im CatLab entwickelten Dünnschichtkatalysators

(Quelle: HZB)



Die Forschungsplattform für Katalyse CatLab

Um die Funktionsweise von Katalysatoren sichtbar und gezielt einstellbar zu machen, ist es notwendig, genau definierte Systeme zu entwickeln und diese unter Reaktionsbedingungen zu beobachten. Dünnschichtsysteme auf Trägern mit unterschiedlichen Funktionalitäten, die individuell und selektiv synthetisiert werden können, versprechen einen völlig neuen zielgerichteten Ansatz. Dank Fortschritten in der Dünnschichttechnologie, z.B. für die Produktion von hocheffizienten Dünnschichtsolarellen ist auch

die Möglichkeit gegeben, Katalysatoren auf technologisch relevanten Großflächen kostengünstig herzustellen. Die Forschungsplattform CatLab, die am Berliner Wissenschaftsstandort Adlershof aufgebaut wird, verfolgt einen solchen völlig neuen Ansatz für innovative Katalysatoren und wird große Teile der Innovationskette abdecken.

Das Helmholtz-Zentrum Berlin (HZB) und zwei Max-Planck-Institute – das Fritz-Haber-Institut (FHI) und das Max-Planck-Institut für Chemische Energy-Conversion (MPI CEC) – bündeln ihre Expertise in der Dünnschicht- und Nanotechnologie sowie in der Katalyse, um Katalysatoren auf Basis maßgeschneiderter funktioneller Dünnschichten zu entwickeln. Diese können bedarfsgerecht an chemische Reaktionsprozesse angepasst und auf vorindustrielles Niveau skaliert werden.

CatLab zielt darauf ab, Innovationssprünge in der Katalyse zu realisieren und wird als Brücke zwischen Grundlagenforschung und Industrie dienen. Synthese und modernste Analysemethoden werden mit neuen Verfahren zur automatisierten Bewertung durch maschinelles Lernen gekoppelt, um das rationale Materialdesign mittels digitaler Katalyse zu beschleunigen. Gleichzeitig werden disruptive Konzepte und Technologien in Zusammenarbeit mit Industrieunternehmen für die industrielle Anwendung skaliert. Die Schwerpunkte von CatLab sind die Erzeugung von grünem Wasserstoff und dessen selektive Umwandlung in leicht transportierbare Chemikalien und synthetische Kraftstoffe, wie beispielsweise verschiedene Alkohole und Ammoniak.

Quellen:

- [1] World Energy Balances Highlights 2021, <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/world-energy-balances-highlights>, abgerufen am 19.09.2022
- [2] Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., https://www.dlr.de/content/de/bilder/2016/1/mit-erneuerbaren-waermequellen-erzielbare-temperaturen_22268.html, abgerufen am 19.09.2022
- [3] Plugging in: What electrification can do for industry, May 28, 2020, McKinsey, <https://www.mckinsey.com/industries/electric-power-and-natural-gas/our-insights/plugging-in-what-electrification-can-do-for-industry>, abgerufen am 08.10.2020
- [4] R. Schlögl, *Angew. Chem. Int. Ed.* 2015, 54, 4436–4439; *Angew. Chem.* 2015, 127, 512–4516.
- [5] Bindig, R., Hartmann, I., Liebetrau, J., Barchmann, T., Baas, H., Kiemel, R., Breuer, C., Casu, S., 2017. REMISBIO: Maßnahmen zur Reduzierung von Emissionen von Biogasanlagen: Katalysatorrest, in: Focus on Bioenergie im Strom- und Wärmemarkt: Projektergebnisse 2015–2016, Fokusheft Energetische Biomassenutzung. DBFZ, Leipzig, pp. 60–65.
- [6] Hoffmann, M.; Kreft, S.; Georgi, G.; Fulda, G.; Pohl, M.-M.; Seeburg, D.; Berger-Karin, C.; Kondratenko, E.V.; Wohlrab, S. Improved catalytic methane combustion of Pd/CeO₂ catalysts via porous glass integration. *Appl. Catal. B Environ.* 2015, 179, 313–320
- [7] Liu, D.; Seeburg, D.; Kreft, S.; Bindig, R.; Hartmann, I.; Schneider, D.; Enke, D.; Wohlrab, S. Rice Husk Derived Porous Silica as Support for Pd and CeO₂ for Low Temperature Catalytic Methane Combustion. *Catalysts* 2019, 9(1), 26; <https://doi.org/10.3390/catal9010026>
- [8] Schliermann, T., Hartmann, I., Dizaji, H.B., Zeng, T., Schneider, D., Wassersleben, S., Enke, D., Jobst, T., Lange, A., Roelofs, F., Fellner, A., Schneider, P., 2018. High quality biogenic silica from combined energetic and material utilization of agricultural residues. Venice 2018.

Hochtemperatur-Wärmespeicher – der Schlüssel zu erneuerbarer und bedarfsgerechter Industriewärme



DLR

Prof. Dr. Annelies Vandersickel
annelies.vandersickel@dlr.de

Stefano Giuliano
stefano.giuliano@dlr.de

Dr. Panagiotis Stathopoulos
panagiotis.stathopoulos@dlr.de

CAE
michael.brueetting
@cae-zeroarbon.de

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

KIT
Dr. Klarissa Niedermeier
klarissa.niedermeier@kit.edu

ZAE Bayern
Michael Brütting
michael.brueetting@zae-bayern.de

Rund 510 Terawattstunden (TWh) benötigt die Industrie in Deutschland jährlich für die Erzeugung von Prozesswärme [1]. Diese Energiemenge entspricht 22% des deutschen Energiebedarfs und deren Erzeugung ist für etwa zwei Drittel des industriellen Treibhausgasen verantwortlich. Eine rasche Wärmewende bzw. Umstellung der Industriewärmeerzeugung auf erneuerbare Energie ist daher zentral, um den Erdgasverbrauch und die Treibhausgasemissionen kurz- bis mittelfristig signifikant zu verringern.

Dabei stellen die verschiedenen Industriezweige und -prozesse höchst unterschiedliche Anforderungen an das Temperaturniveau: Während das Trocknen von Papier bereits ab etwa 160°C möglich ist, benötigen Brenn- und Schmelzprozesse Temperaturen bis zu deutlich über 1.000°C [2].

Insbesondere für den Temperaturbereich unterhalb von 400°C stehen verschiedene technologische Lösungen zur Verfügung: Einbindung von regenerativen Wärmequellen, wie z. B. (konzentrierender) Solarwärme und Elektrifizierung mit erneuerbarem Strom über Wärmepumpen und/oder Elektrodenkessel.

Für Temperaturen oberhalb 400°C stehen als Technologieoptionen neben der stark diskutierten Nutzung alternativer Energieträger, wie z. B. grünen Wasserstoffs, die Nutzung solarer Hochtemperaturwärme und die Einbindung erneuerbaren Stroms über Power-to-Heat-Lösungen zur Verfügung. Zentral bei jeder dieser Optionen ist die Frage nach dem Ausgleich zwischen erneuerbarer Erzeugung und Wärmebedarf. Der vorliegende Beitrag beleuchtet die Rolle des Wärmespeichers in diesem Kontext und bietet einen kompakten Überblick über vorhandene Speichertechnologien, sowie aktuelle Hemmnisse.

Beitrag von Wärmespeichern zur Dekarbonisierung der Wärmeversorgung im Industriebereich

- *Schlüssel zu bedarfsgerechter erneuerbarer Industriewärme*

Egal ob Solarturm oder Niedertemperatur-Solkollektoren, die Wärmeezeugung durch Solarsysteme fluktuiert sowohl im Tagesablauf als auch saisonal. Daher kann solare Wärme nur in Kombination mit Wärmespeichern zuverlässig und bedarfsgerecht bereitgestellt werden. Unterhalb von 400°C kommen Solarkollektoren wie z. B. Parabolrinnen zum Einsatz, welche in Kombination mit Wärmespeichern auch in Mitteleuropa signifikante Deckungsanteile von über 30% ermöglichen.

Für höhere Temperaturen kann die Solarturm-Technologie – insbesondere an Standorten mit hoher Solareinstrahlung und in Kombination mit Hochtemperatur-Wärmespeichern – wirtschaftlich hohe solare Deckungsgrade bis hin zu einem 24/7-Betrieb erlauben. Das DLR entwickelt dazu z. B. Partikelbasierte Receiver – und Speicherkonzepte z. B. für Prozesswärme zur Pastaherstellung [3] oder die thermische Vorbehandlung von Mangan-Erzen [4].

Eine weitere Möglichkeit der erneuerbaren Wärmebereitstellung im Hochtemperaturbereich kann über die Elektrifizierung der Wärmeversorgung mit erneuerbarem Strom erfolgen (Power-to-Heat). Dabei wird der fluktuierende erneuerbare Strom (aus PV, Wind, etc.) über eine Wärmepumpe (bis ca. 250°C), Elektrodenkessel oder Elektroerhitzer in Hochtemperaturwärme gewandelt. Über den Hochtemperatur-Wärmespeicher wird dann eine bedarfsgerechte Wärmebereitstellung ermöglicht, welche der Last des Industrieprozesses angepasst ist. Großtechnische Wärmespeicher sind hierbei das entscheidende Element, um aus dem fluktuierenden erneuerbaren Strom eine gesicherte Wärmeleistung für

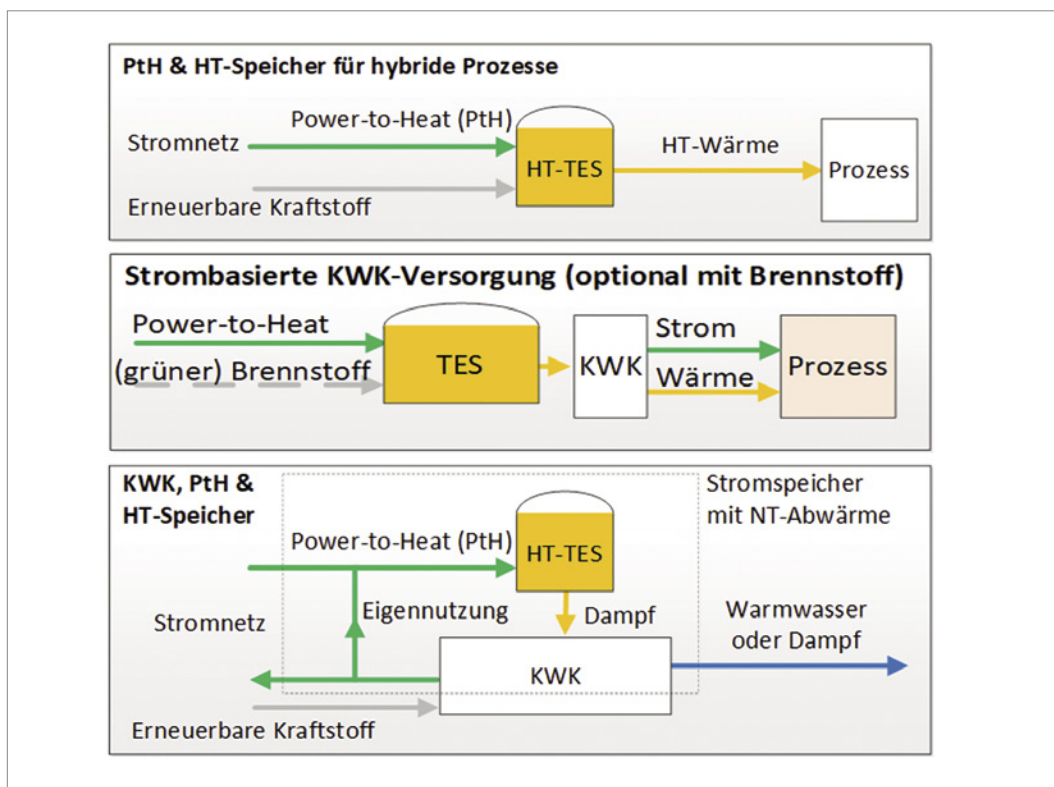


Abbildung 1

Rolle des Wärmespeichers an der Schnittstelle zwischen der Strom- und Wärmeversorgung

(Quelle: DLR)

den Industriestandort bereitzustellen. Auch hier stehen für die verschiedenen Industriewärmeanwendungen verschiedene Speichersysteme zu Verfügung, die sich im Einsatz der Speichermedien und ihrem einsetzbaren Temperaturbereich unterscheiden (bis >1000 °C). Der entscheidende Vorteil ist, dass man Wärme in Wärmespeichern deutlich wirtschaftlicher im Vergleich zu Strom speichern kann.

- *Flexibilisierung des Strombedarfs für die industrielle Wärmeversorgung*

Hochtemperaturwärmespeicher spielen in Kombination mit Power-to-Heat-Systemen auch eine wichtige Rolle an der Schnittstelle zwischen Strom- und Wärmeversorgung. Die – im Vergleich zu reinen Power-to-Heat-Systemen – deutlich höhere Flexibilisierung des Strombedarfs unterstützt über eine netzdienliche Betriebsweise die Integration hoher Anteile erneuerbarer Energien im Stromnetz. Durch die Speicherintegration können die entsprechenden Power-to-Heat-Einheiten zudem deutlich kleiner ausgelegt werden, was zu einer weiteren Entlastung des Stromnetzes führt.

Hochtemperatur-Wärmespeicher bieten darüber hinaus die Möglichkeit, die eingespeicherte Wärme bzw. den eingespeicherten erneuerbaren

Strom bei Bedarf in thermischen Kraftwerken wieder in Strom umzuwandeln und gleichzeitig Wärme auf dem benötigten Niveau auszukoppeln. Im Kontext der Industriewärme bieten solche Power-to-Heat-to-Power-Lösungen (Wärmespeicherkraftwerke (WSK) oder Carnot-Batterien mit Wärmeauskopplung) Industriestandorten die Option der Eigenstromerzeugung, insbesondere wenn erneuerbarer Netzstrom nicht vorhanden ist. Neben der Entlastung der Netze bietet das den Betreibern auch eine höhere Planungssicherheit bzgl. der Energiekosten und –bereitstellung [5].

- *Steigerung der Effizienz durch Abwärmenutzung*

Obwohl die Integration von erneuerbarer Energie den größten Hebel zur Reduktion der Emissionen bei der Wärmeversorgung in der Industrie darstellt, ist die Einbindung von Abwärme weiterhin ein wichtiger Faktor, um diese Aufgabe wirtschaftlich bewältigen zu können und die Anforderungen an den Ausbau von erneuerbarer Energie zu reduzieren.

Je nach Anwendung kann die Temperatur der Abwärme dabei über eine Wärmepumpe angehoben werden oder die Wärme direkt in den Prozess reintegriert werden. Auch hier sind Speicher ein entscheidendes Element, um die Unterschiede zwischen dem Aufkommen und dem Bedarf der

	Regenerator	Regenerator	Flüssigsalz	Ruths	PCM	Flüssigmetall
Speichermaterial	Keramik	Naturstein-schüttung	Nitratsalz flüssig	Druckwasser	Nitratsalz fest/flüssig	Festkörper-schüttung
Energiedichte in kWh/m ³	75 - 200	75 - 200	75 - 200	bis 100	50 - 200	75 - 200
Kapazität	bis 1000 MWh	k.A.	bis 4500 MWh	bis 30 MWh	bis 500 MWh	100 kWh
Typ. Temperaturen	400-1600 °C	200-800 °C	170-560 °C	150-230 °C	130-330 °C	100-700 °C
Typ. Wärmeträger	Gase	Gase	WÜ für überhitzter Dampf	Sattdampf, Druckwasser	Dampf, max. Überh. 330 °C	Flüssigmetall, WÜ für überhitzter Dampf
Investitionskosten TES in €/kWh	15 – 40	k.A.	15 – 70	70 – 300	40 – 80	k.A.
Technologiereife	6 – 9 TRL	4 – 5 TRL	4 – 9 TRL	8 – 9 TRL	4 – 5 TRL	3 – 4 TRL

Tabelle 1
Portfolio der Wärmespeichertechnologien
und deren Eigenschaften
(Quelle: DLR)

Abwärme auszugleichen und die erneuerbare Energie, die am Anfang der Prozesskette eingeflossen ist, möglichst effizient zu nutzen. Speicherkonzepte zur Abwärmenutzung gibt es schon länger und erste Pilotprojekte sind in Planung [6] oder umgesetzt [7], der große Durchbruch ist bisher aber oft an den wirtschaftlichen Rahmenbedingungen gescheitert. Aufgrund steigender Energiepreise und erhöhtem Druck zur Dekarbonisierung sind diese aber zunehmend interessant.

Zur Verfügung stehende thermische Speichertechnologien

Genau wie bei der Industrie-Wärmeerzeugung besteht auch bei der Industrie-Wärme-Speicherung keine „One-Fits-All“-Lösung. Für die Auswahl des Hochtemperaturspeichers müssen für jede Anwendung individuell verschiedene Bewertungskriterien beachtet werden:

- prozesstechnische (z. B. Temperatur, Wärmeträgermedium ...) und räumliche (z. B. Aufstellungsfläche) Möglichkeiten für die Einbindung in bestehende oder geplante Anlagen/Infrastruktur
- technische und betriebsbedingte Einsatzgrenzen (Temperaturniveau, Temperaturspreizung, dynamisches Verhalten ...)

Um diese gesamte Bandbreite an Anwendungen zu bedienen, steht ein breites Portfolio an Wärmespeichertechnologien zur Verfügung. Ein Überblick ist in ► **Tabelle 1** gegeben.

Feststoffwärmespeicher – meist auf der Basis von stapelbaren Formsteinen aus Feuerfestkeramiken mit Luft als Wärmeträger – können zur Wärmespeiche-

rung bei Temperaturen bis über 1000 °C eingesetzt werden und daher hohe Energiespeicherdichten erzielen. Heutige Anwendungen finden sich z. B. in der Stahl-, Glas- und Baustoffherstellung. Aktuelle Forschungsarbeiten zielen auf Kostensenkungen durch die Verwendung von Schüttungen und die Nutzung von Naturstein und die Lösung der damit einhergehenden Entwurfsfragen [8]. Weitere Aktivitäten erarbeiten Lösungen für die Integration der Speicher mit Power-to-Heat-Technologie [9,10]. Feststoffspeicher auf der Basis bewegter, sandähnlicher Partikel sind eine Sonderform des sensiblen Feststoffspeichers, die für die Hochtemperaturspeicherung in solarthermischen Kraftwerken untersucht wird [11].

Für den Temperaturbereich von 170 °C bis 560 °C eignen sich Flüssigsalz-Speicher, heute Stand der Technik in thermischen Solarkraftwerken. Aktuelle Entwicklungen zielen auf eine Erweiterung des Einsatzbereichs bis zu 620 °C, sowie auf eine Kostenreduktion durch den Einsatz von Eintankkonzepten, z.B. mit einer beweglichen Trennschicht oder das Ersetzen eines Teils des Salzes durch Feststoffkörper [12]. Ähnliche Festbettspeicherkonzepte wurden auch für den Einsatz mit Thermo-Öl als Wärmeträgermedium für den Temperaturbereich 200–450 °C demonstriert. Auch Flüssigmetall-basierte Systeme bieten die Möglichkeit in einem relativ breiten Temperaturbereich durch die hervorragenden Wärmeübertragungseigenschaften effizient Wärme an eine keramische Schüttung zu transportieren, welche die Wärme speichert.

Herausforderungen sind v.a. die Kompatibilität mit den relevanten Komponenten (z. B. Ventile) und der Messtechnik. Daher wird in Kooperation mit dem Hersteller KSB beim DLR der Einsatz von Pumpen und Ventilen jenseits des Stands der Technik bei bis zu 700 °C erprobt [13].

PCM-Speicher runden das Portfolio ab mit hohen Energiedichten aufgrund des Phasenwechsels. Auch hier wurden in den letzten Jahren mehrere Konzepte demonstriert mit dem Fokus auf die Entwicklung von Hochleistungskomponenten. [14,15].

Herausforderungen beim Transfer in die Praxis

Die Kernherausforderungen bei der Umsetzung von Wärmespeichern in der Industrie sind nachfolgend kompakt zusammengefasst:

- keine "One-Fits-All"-Lösungen
- fehlende Tools für einen systematischen Speichervergleich, sowie fehlende F&E-Programme für solche Potenzialstudien zur Prozessdetailbetrachtung
- genehmigungstechnische und sicherheitstechnische Lücken in Regelwerken für neue Speicher
- fehlende Anreize für erstmalige Demonstration neuer Konzepte in Anwendung
- niedrige Energiepreise und hoher Wettbewerbsdruck erschwere Amortisation
- hohe Anfangsinvestitionskosten im Vergleich zu erneuerbaren Kraftstoffen und fehlende Contracting-Lösungen, um eventuelle fehlende Erfahrung mit dem Betrieb von Energieversorgungsanlagen auszugleichen

Zusammengefasst: Hochtemperatur-Wärmespeicher für Prozesswärme

- sind ein Schlüsselement zur Integration großer Solar- und Windanteile in der Wärmeversorgung sowohl in Kombination mit WP, CSP als auch PTH
- bieten sehr hohes Potenzial für Flexibilität am Strommarkt / Sektorkopplung
- sind bereits als Feststoffspeicher und Speicher mit flüssigen Medien bis zu 600 °C verfügbar und zum Teil etabliert oder demonstriert
- Größere Demonstrationsprojekte sind aber weiterhin erforderlich, um Vertrauen für den Einsatz in Industrie-Prozesswärme-Anwendungen zu generieren.
- Im Hinblick auf die erforderliche Größe von Industrie-Speichern besteht weiterer Forschungsbedarf hinsichtlich Hochskalierung im Multi-MWh-Bereichs, sowie hinsichtlich noch kompakterer, leistungsstärkerer und kostengünstigerer Konzepte und höheren Temperaturen (>600 °C).

Referenzen

1. Agora Industrie, FutureCamp (2022): Power-2-Heat: Erdgaseinsparung und Klimaschutz in der Industrie
2. Prozesswärme-Bedarf in der Industrie – NRW. Energy4Climate
3. DLR - Institut für Solarforschung – HiFlex
4. Energy efficient, primary production of manganese ferroalloys through the application of novel energy systems in the drying and pre-heating of furnace feed materials | A.SPIRE (aspire2050.eu)
5. BMWK-gefördertes Projekt SWS-SYS, FKZ 03EI3045
6. Industrielle Abwärmennutzung einer Gießerei durch thermische Energiespeicherung in Kombination mit einem Absorptionsprozess – iAST – Schlussbericht – Gurtner, Richard / Eckl, Dietmar / Jennes, Ralf, 2022
7. FENOPTHES – Füllkörperentwicklung und -optimierung für thermische Speicher – Fraunhofer ISE
8. Krüger, Michael und Haunstetter, Jürgen und Hahn, Joachim und Knödler, Philipp und Zunft, Stefan (2020) doi: 10.3390/en13226092. ISSN 1996-1073.
9. Dreißigacker, Volker und Belik, Sergej (2021) Entwicklung und Erprobung eines elektrisch beheizten Hochtemperaturspeichers im Rahmen des Projekts Energy Lab 2.0. ISBN 978-3-949169-02-1
10. Belik, Sergej (2021) Development of high-performance air heater based on an inductively heated packed bed. XIX International UIE-Congress, 01.–03. September 2021, Plzen, Tschechien
11. Hertel, Julian D. und Zunft, Stefan (2022) Applied Thermal Engineering, 206 (118092). Elsevier.
12. BMWK-gefördertes Projekt VeNiTe, FKZ 03EE5043A
13. BMWK-gefördertes Projekt LIMELISA, FZK 03EE5050
14. BMWK-gefördertes Projekt PROLATENT, FKZ 0325549A
15. EU-gefördertes Projekt – CHESTER (chester-project.eu)

Neubau und Transformation hocheffizienter Wärmenetze im Kontext der Dekarbonisierung und Flexibilisierung unserer Energiesysteme



Fraunhofer IEE
Dr. Anna Marie Cadenbach
anna.cadenbach@iee.fraunhofer.de

CAE
Stephan Weismann
stephan.weismann
@cae-zeroarbon.de

DBFZ
Heike Gebhardt

Fraunhofer ISE
Axel Oliva
axel.oliva@ise.fraunhofer.de

ISFH
Bert Schiebler
schiebler@isfh.de

Wuppertal Institut
Dietmar Schüwer
dietmar.schuewer@wupperinst.org

Fernwärme (FW) spielt aufgrund ihres Potenzials zur effizienten Integration erneuerbarer Energien (EE) und Abwärme eine entscheidende Rolle für die Umsetzung der Wärmewende. Im Rahmen dieses Beitrags werden Herausforderungen, Maßnahmen und Trends sowie Projektbeispiele für die künftige Fernwärmeversorgung beleuchtet.

Status Quo und aktuelle Herausforderungen bei der leitungsgebundenen Wärmeversorgung

Bis 2030 verpflichtet sich die Bundesregierung im novellierten Klimaschutzplan die Treibhausgas-Emissionen um 65 % gegenüber 1990 zu reduzieren. Bis 2045 soll die Treibhausgasneutralität erreicht werden [1].

Auf den Gebäudesektor entfallen für Raumwärme und Trinkwarmwasser ca. 34 % des Endenergieverbrauchs [3]. Dieser Sektor stellt aufgrund seiner Größe sowie der Langlebigkeit der Infrastrukturen eine zentrale Herausforderung und einen entscheidenden Hebel zur Umsetzung der Wärmewende dar. Die Bereitstellung der Wärme basiert derzeit bis zu 85 % auf fossilen Brennstoffen [2]. Aktuell werden rund 14 % der Gebäude mit Fernwärme versorgt, dabei handelt es sich im Wesentlichen um urbane Systeme im verdichteten Raum, welche zu 19 % auf EE basieren [4–6]. Derzeitige Entwicklungen zeigen eher zurückhaltende Neubauaktivitäten und kleinteilige Transformationsmaßnahmen. Die Zurückhaltung ist häufig auf technologische und wirtschaftliche aber auch auf rechtliche Restriktionen zurückzuführen [8].

Maßnahmen zur Dekarbonisierung, Transformation, Flexibilisierung sowie Digitalisierung der Fernwärme

Neben dem vermehrten Einsatz von z. B. Wärmepumpen und der Umsetzung weiterführender Effizienzmaßnahmen, gilt die Fernwärme als ein Schlüssel für die erfolgreiche Umsetzung der Wärmewende [9]. Für eine zukunftsorientierte und umweltfreundliche leitungsgebundene Wärmeversorgung existieren verschiedene Maßnahmen.

Die Dekarbonisierung ist eine zentrale Maßnahme für eine klimagerechte Energieversorgung. Im Allgemeinen hängt die erfolgreiche Dekarbonisierung der Wärmebereitstellung von gebäude-seitigen Maßnahmen (z. B. Sanierung von Heizung und Dämmung) sowie der vermehrten Integration von EE und Abwärme ab. Vor dem Hintergrund der Transformation ist eine Umstellung der Netz- und Erzeugerinfrastrukturen zu Gunsten der Einbindung von EE und Abwärme unter Berücksichtigung der dezentralen Wärmeeinspeisung sowie der Kopplungspotenziale der Sektoren erforderlich [8]. Die Umstellung, aber auch der Neubau von thermischen Netzen erfordern den Einsatz neuer Betriebsstrategien für die effiziente Integration von regenerativen, volatilen Wärmequellen. Die Integration dieser Wärmequellen bedingt den Neubau oder den Wandel hin zur Niedertemperatur-Wärmeversorgung z. B. mit netzdienlicher Betriebsweise für erneuerbare Energiequellen.

Weitere Maßnahmen für den Ausbau hocheffizienter Wärmenetze stellen die Flexibilisierung und Digitalisierung dar. Im Zusammenhang der Flexibilisierung von thermischen Netzen ist künftig eine darbotsorientierte Betriebsweise bei multivalenter und volatiler Nutzung von Wärmequellen notwendig [13–14]. Die Digitalisierung stellt wiederum eine weitere wichtige Schlüsselmaßnahme für den Betrieb, die Regelung und die Umsetzung innovativer Wärmenetze dar [10].

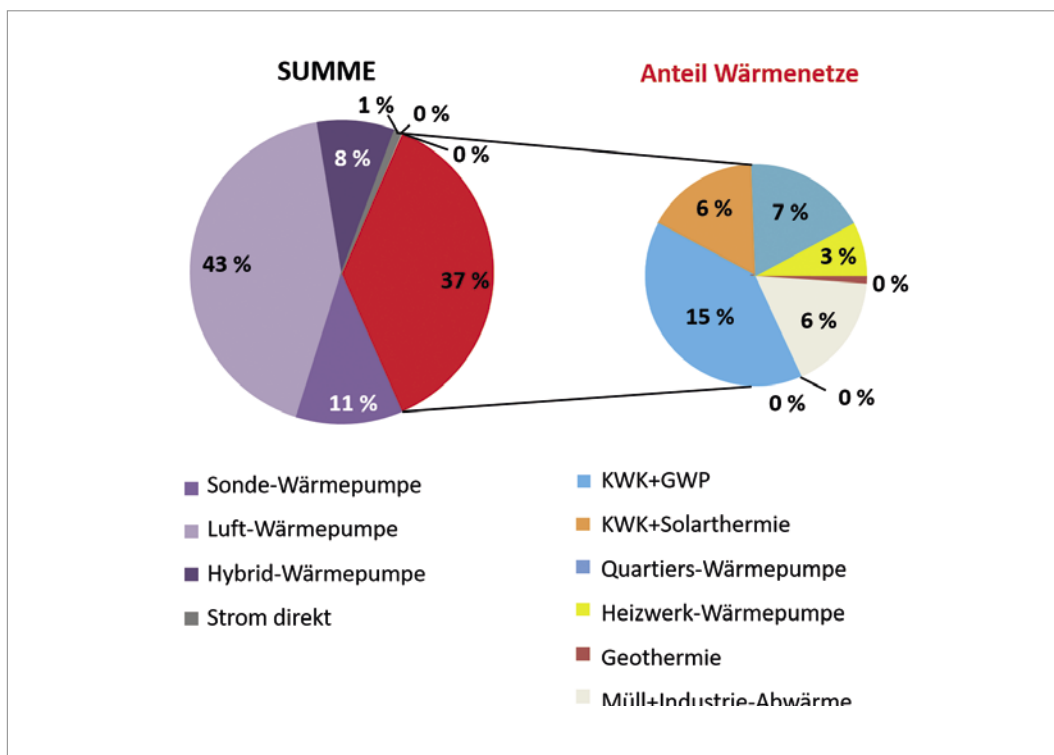


Abbildung 1
Notwendiger Ausbau sowie Neubau von Wärmenetzen bis zum Jahre 2030 [5]
 (Quelle: Wuppertal Institut)

Vor dem Hintergrund der beschriebenen Maßnahmen und um den verschärften Zielen der Bundesregierung im Kontext der Wärmewende gerecht zu werden, ist die Transformation und der Neubau von Wärmenetzen bereits bis zum Jahr 2030 notwendig [9]. Verschiedene Studien prognostizieren einen frühzeitigen Ausbau der Wärmenetze von heute 14% auf 30 bis 37% bereits bis 2030 (► *Abbildung 1*) [5–6]. Dies entspricht in etwa einem Steigerungsfaktor von 6 bis 7 gegenüber dem bestehenden Netzausbau (► *Abbildung 2*) [5].

Die Verringerung der Treibhausgas-Emissionen erfordert wiederum einen Anstieg des Anteils der erneuerbaren Energien zur Fernwärmeerzeugung bereits auf 45% bis 2030 [11]. Im Kontext des Fernwärme-

ausbaus bis 2030 beziffern Prognosen geschätzte Investitionen in Höhe von insgesamt 33 Mrd. EUR, wovon 16 Mrd. EUR für den Ausbau und Neubau von Wärmenetzen veranschlagt werden [12].

Neben technologischen Maßnahmen erfordert die Umsetzung der leitungsgebundenen Wärmeversorgung eine gesellschaftliche Akzeptanz, die Schaffung von Anreizen und eine Stärkung des Handwerks [8]. Neben der Erhebung und Beseitigung von Hemmnissen (z. B. Flächenverfügbarkeit) stellt die weitere Optimierung ihrer Wirtschaftlichkeit eine essenzielle Voraussetzung für die erforderliche Beschleunigung der Marktdurchdringung dar.

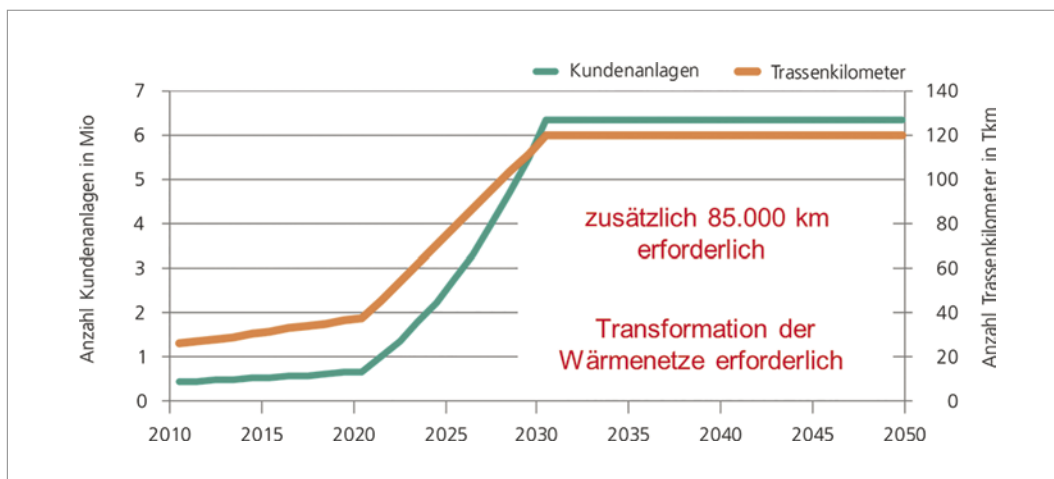
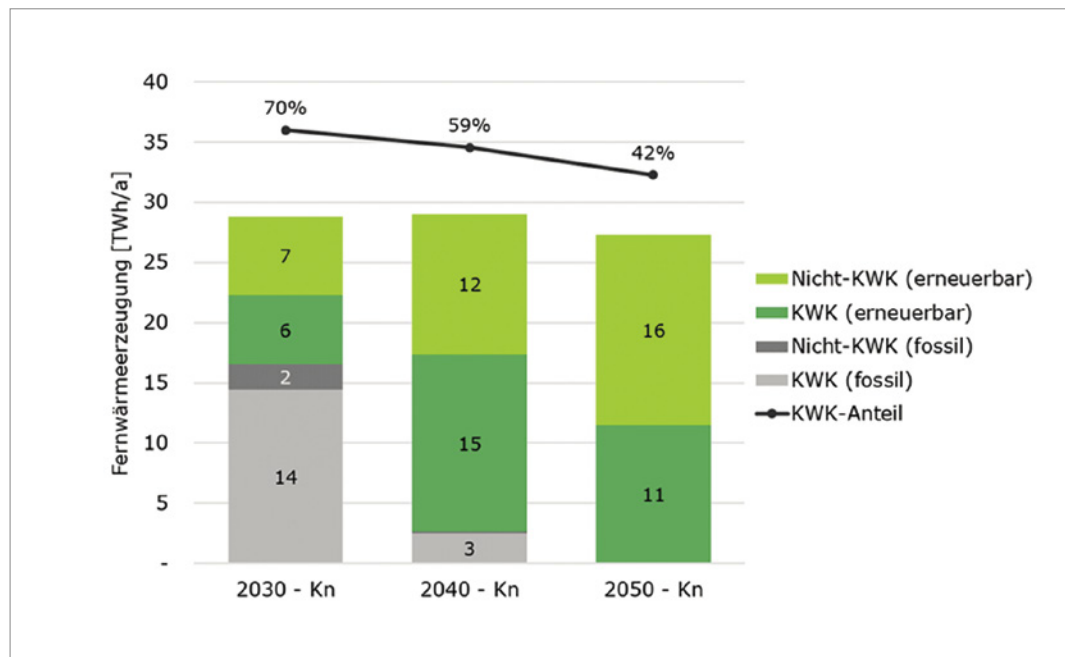


Abbildung 2
Notwendiger Zubau von thermischen Netzen und Steigerungsfaktor gegenüber dem bestehenden Netzausbau [5]
 (Quelle: Wuppertal Institut)

Abbildung 3
Anteile der KWK an der allgemeinen Fernwärme-Versorgung im Klimaschutz-szenario NRW [17]
 (Quelle: LANUV)



Ausgewählte Trends für bestehende und neue hocheffiziente Niedertemperatur-Wärmenetze

Vor dem Hintergrund der zuvor vorgestellten Maßnahmen dominieren nachfolgend ausgewählte Trends die Entwicklung der leitungsgebundenen Wärmeversorgung.

- *Senkung der Temperaturen in thermischen Netzen:* Je nach Größe des Netzes kann bei großen Netzen mit Temperaturen von <math><100^{\circ}\text{C}</math> und bei kleineren Netzen mit <math><80^{\circ}\text{C}</math> gerechnet werden. In sehr kleinen Netzen mit neueren Gebäuden sind Temperaturen <math><60^{\circ}\text{C}</math> möglich [10].
- *Vielfältigere und komplexere Anlagenparks:* Im Kontext der multivalenten und dezentralisierten Versorgung sind aufgrund der Substitution von einzelnen, zentralen, fossilen Wärmebereitstellungsanlagen durch mehrere, ggfs. dezentrale Technologien erforderlich [13].
- *Ausbau der Sektorkopplung* [14]: Steigerung der Flexibilität von stromnetz-dienlichen Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen und Erweiterung um elektrische Wärmeerzeuger.
- *Der Einsatz solarthermischer Großanlagen* bietet eine vielversprechende Lösung zur Dekarbonisierung von Wärmenetzen. Aktuell sind deutschlandweit 48 Anlagen in Betrieb und weitere 60 in Realisierung oder Vorbereitung. Die Industrie rechnet mit einem jährlichen Zubau von 1 Mio. m^2 (0,5 TWh) bis 2030 [15].
- *Der Einsatz von Speichertechnologien* bietet eine diversifizierte Einbindung von EE und Abwärme.

- *Digitale Technologien* können das gesamte Energiesystem intelligenter, effizienter und zuverlässiger machen sowie den Netz- und Anlagenbetrieb optimieren. Somit kann vermehrt fluktuierende erneuerbare Energie in das System eingespeist werden.

Forschung für die künftige Fernwärmeversorgung

Im Folgenden werden ausgewählte Forschungsprojekte für die Fernwärmeversorgung vorgestellt, die sich der Transformation, Dekarbonisierung, Flexibilisierung sowie Digitalisierung der Fernwärme widmen.

KWK-Pot-NRW:

Potenzialstudie zur Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) in Nordrhein-Westfalen.

Technische Potenziale zur thermischen Residuallastdeckung durch KWK in der allgemeinen Wärmeversorgung im Klimaneutral-Szenario NRW

Derzeit dominiert mit über 80% die Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) die Wärmebereitstellung in Wärmenetzen [16]. In einer Studie für das Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (LANUV) wurden unter anderem der Status quo und die künftigen Potenziale der Wärmeversorgung durch KWK für die Nah- und Fernwärme ermittelt [17]. Unter der Voraussetzung einer ambitionierten Gebäudesanierung lassen sich bis 2050 ein Viertel des Wärmebedarfs von Gebäuden durch

thermische Netze klimaneutral decken. Aufgrund einer steigenden Gebäudeenergieeffizienz sinkt im Zeitraum von 2030 bis 2050 die absolute Fernwärme-Erzeugung geringfügig. Der KWK-Anteil verringert sich im gleichen Zeitraum von 70% auf 42%, wobei die fossile KWK gänzlich zugunsten erneuerbarer KWK und erneuerbarer Nicht-KWK ausläuft (► *Abbildung 3*).

Bezüglich künftig eingesetzter Energieträger wird es eine deutliche Verschiebung von Erdgas zu Abwärme, Strom (mit Wärmepumpe), Wasserstoff und Solarthermie geben (► *Abbildung 4*). Die Einsatzzeiten der KWK sinken zugunsten klimaneutraler Nicht-KWK-Technologien. Zukünftige und vorrangige Aufgabe der KWK ist somit, flexibel die residuale Wärme- und auch Stromlast abzuschließen.

HP-BIG:

Senkung des Wärmepreises bei solarthermischen Großanlagen mit Heatpipe-Vakuumröhrenkollektoren:

Der Einsatz solarthermischer Großanlagen in Wärmenetzen bietet große Potenziale für die Dekarbonisierung. Vor diesem Hintergrund besteht das Ziel des vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) geförderte Verbundvorhaben „HP-BIG“ (FKZ: 03EN6011A-C) in der Senkung des Wärmepreises bei Großanlagen mit Vakuumröhrenkollektoren um bis zu ca. 30%. Zur Erreichung dieses Zieles werden im Projekt neuartige Konzepte basierend auf stagnationssicheren Gravitationswärmehohr (Englisch: Heatpipes) erarbeitet, erprobt und bewertet. Aufgrund ihrer einfachen Hydraulik und

der Möglichkeit, die Kollektortemperatur gezielt zu begrenzen, bieten diese ein noch nicht erschlossenes Potenzial für den Einsatz z. B. bei der Unterstützung von Wärmenetzen mit hohen solaren Deckungsanteilen. Darüber hinaus können signifikante Kosteneinsparungen sowohl im Kollektor- als auch im Solarkreisbereich erreicht werden. Innovative Komponenten und Systeme werden in einer Demonstrationsanlage umgesetzt, die als sogenanntes „Live Lab“ über ein Jahr wissenschaftlich begleitet wird.

EnWiSol

Solarthermie in der städtischen Energieversorgung, Energiewirtschaftliche Analyse und Demonstrationsvorhaben Freiburg-Gutleutmaten

Das Ziel des vom BMWK geförderten Projekts „EnWiSol – Solarthermie in der städtischen Energieversorgung“ (FKZ: 03ETS005A/B) ist es, die Rolle der Solarthermie bei der Versorgung urbaner Quartiere unter aktuellen und zukünftigen energiewirtschaftlichen Randbedingungen zu analysieren. Um diese komplexe Zielstellung durch einen automatisierten zentralen Regler zu erreichen, wird ein modellprädiktiver Regelungsalgorithmus entwickelt. Aufbauend auf Vorhersagen des Warmwasserverbrauchs der einzelnen Gebäude und der Solarerträge berechnet der Regler den optimierten Fahrplan für die Wärmeverteilung zwischen den Häusern und die Wärmeanforderung an die zentrale Wärmeversorgung. Darüber hinaus wird ein innovatives Betriebskonzept entwickelt und implementiert, mit dem jede einzelne dezentral angeordnete Solarthermieanlage auch als Einspeiser in das Netz fungieren kann.

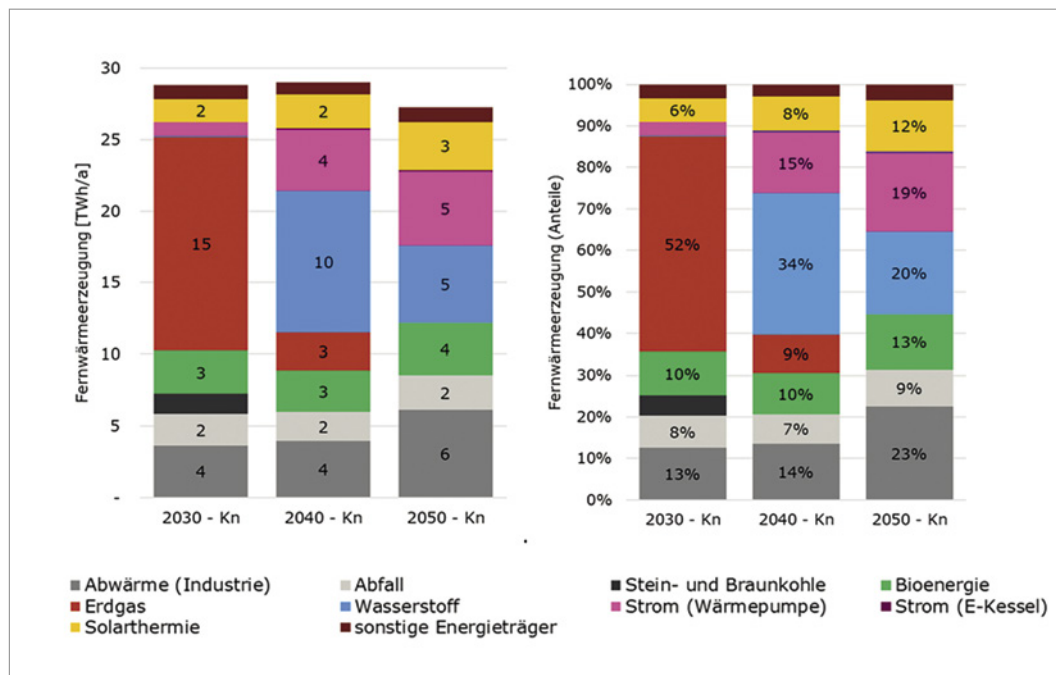


Abbildung 4
Absolute und relative Energieträgeranteile für die allgemeine Fernwärme-Versorgung im Klimaschutz-szenario NRW [17]
(Quelle: LANUV)

EnEff:Wärme:Smart Heat

Digitalisierung von Wärmeversorgungsstrukturen in einem virtuellen Wärmekraftwerk

Die Digitalisierung macht Wärmenetze nachhaltiger und zuverlässiger. Vor diesem Hintergrund widmet sich das vom BMWK geförderte Vorhaben „EnEff: Wärme:Smart Heat“ (FKZ: 03ET1673 A- C) der Untersuchung von Potenzialen und Möglichkeiten der Digitalisierung im Bereich der leitungsgebundenen Wärmeversorgung am Beispiel der energy Netz GmbH in Hannover. Durch den Einsatz von Informations- und Kommunikationsstrukturen soll die Steigerung der Effizienz bei der Wärmeversorgung erreicht werden. Darüber hinaus erfolgt die Einflussanalyse der Flexibilisierung auf die Wirtschaftlichkeit der Wärmebereitstellung. Zur Demonstration der Flexibilität wird die Implementierung eines digitalen, zentralen Leitsystems sowie kommunizierender Regeleinheiten in den Übergabestationen vorgenommen.

EnEff:Wärme:HybridBOT_FW

Transformation und Betriebsoptimierung von Wärmenetzen zur netzdienlichen Quartiersversorgung

Die Flexibilisierung thermischer Netze ermöglicht die multivalente und volatile Nutzung von regenerativen Wärmequellen durch eine dargebotsorientierte Betriebsweise. Vor diesem Hintergrund untersucht das vom BMWK geförderte Projekt „EnEff:Wärme:HybridBOT_FW“ (FKZ: 03EN3041 A-F) die Möglichkeiten der Betriebsoptimierung von Wärmenetzen als Teil eines hybriden Energiesystems. Eine Geschäftsmodell- und Wirtschaftlichkeitsanalyse beleuchtet wirtschaftliche und regulatorische Anforderungen im Kontext der Sektorenkopplung. Mittels Co-Simulation von Strom-Wärme-Systemen erfolgt eine Bewertung von Transformationsoptionen und Flexibilisierungspotenzialen zur Entwicklung von Betriebsoptimierungsstrategien. Die entwickelten Ansätze werden durch experimentelle Untersuchungen in einer Laborumgebung mit Hilfe eines Digitalen Zwillings verifiziert. Zur Umsetzung und Demonstration wird die Implementierung der verifizierten Betriebsstrategien im Feld vorgenommen und einem Langzeit-Monitoring unterzogen. Als Demonstrator dienen ein Neubau- und ein Bestandsgebiet in Neuburg an der Donau.

Zusammenfassung

Der Fernwärme obliegt eine entscheidende Rolle für die Dekarbonisierung, Flexibilisierung und Digitalisierung des Wärmesektors. Um den Anforderungen eines künftigen Energiesystems zu genügen, ist der Neu- und Ausbau zugunsten multivalenter Erzeugerstrukturen auf Basis von regenerativen, volatilen Wärmequellen notwendig. Diese Wärmequellen erhalten Vorrang vor brennstoffbasierter Wärmeerzeugung. Somit ändert sich auch die Rolle der KWK von heutiger grundlastgeführter Fahrweise hin zur Bereitstellung residualer Wärme- und Stromlasten. Neben reinen technologischen Maßnahmen sind der Abbau von Hemmnissen, die Erhöhung der Akzeptanz, die Einführung von Anreizen und eine Stärkung des Handwerks erforderlich. Die im Rahmen dieses Beitrags beleuchteten Projektbeispiele verdeutlichen, dass langfristig eine vollständige Transformation und Dekarbonisierung der Fernwärmeversorgung mit einem Mix verschiedener Technologien möglich ist.

Quellen

- [1] BMWi Energiedaten 2019 / Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen https://ag-energiebilanzen.de/wp-content/uploads/2019/01/ag-energie_in_zahlen_2019.pdf
- [2] Erneuerbare Energien in Deutschland – Daten zur Entwicklung im Jahr 2020. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt, 2021.
- [3] BDEW (2020), Beheizungsstruktur des Wohnungsbestandes. <https://www.bdew.de/service/daten-und-grafiken/beheizungsstruktur-baugenehmigungen-aktuell/>
- [4] BDEW (2021), Nettowärmeerzeugung nach Energieträgern in Deutschland – zur leitungsgebundenen Wärmeversorgung. https://www.bdew.de/media/documents/20210122_BDEW-Zahl_der_Woche_Grafik_Fernwaerme.pdf
- [5] Gerhardt et. al (2019), Transformationspfade im Wärmesektor Betriebs- und volkswirtschaftliche Betrachtung der Sektorkopplung mit dem Fokus Fernwärme mit hohen Anteilen konventioneller KWK-Erzeugung und Rückkopplung zum Gesamtenergieversorgungssystem
- [6] AGFW (2020), AGFW Hauptbericht 2019. Statistik des Bereiches Energiewirtschaft und Politik.
- [7] Wärmewende 2030 - Schlüsseltechnologien zur Erreichung der mittel- und langfristigen Klimaschutzziele im Gebäudesektor <https://www.agora-energiewende.de/veroeffentlichungen/waermewende-2030-1/>
- [8] AGFW (2022) Forschungsprojekt UrbanTurn – Fernwärmenetze im Kontext nationaler Klimaziele: Potenziale für „UrbanTurn“, <https://www.agfw.de/forschung/urbanturn>
- [9] BDEW (2021), Grüne Fernwärme für Deutschland – Potenziale, Kosten, Umsetzung, <https://www.bdew.de/energie/die-gruene-fernwaerme-ist-wichtiger-baustein-der-waermewende/>
- [10] Hay, et al, Existing District Heating Networks in Context of German Climate Goals: Potentials for “UrbanTurn”, ISEC Conference Graz, 07th April 2022
- [11] Wunsch, M., Thamling, N., Maas, C. et al. (2020), Perspektive der Fernwärme. Im Auftrag des AGFW | Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e.V., Frankfurt, Germany.
- [12] AGFW, Solites, TU Dresden (2020). DELFIN – DecentralizedFeed-In: Prognose der Auswirkungen dezentraler Einbindung von Wärme aus erneuerbaren Energien und anderen Wärmeerzeugern in Fernwärmenetze, März 2020.
- [13] Trieb, Merlin Sebastian; Papadis, Elisa; Cramer, Hannes; Tsatsaronis, George (2021): Landscape of district heating systems in Germany – Status quo and categorization. In: Energy Conversion and Management: X 9 (4), S. 100068. DOI: 10.1016/j.ecmx.2020.100068.
- [14] Markus Millinger, Philip Tafarte, Martin Dotzauer, Katja Oehmichen, Annedore Kanngießler, Benedikt Meyer, Anne Hagemeier (2017): Synergien, Wechselwirkungen und Konkurrenzen beim Ausgleich fluktuierender erneuerbarer Energien im Stromsektor durch erneuerbare Optionen. BalanceE - Gemeinsamer Endbericht. FKZ: 0325705. Hg. v. Helmholtz Zentrum für Umweltforschung UFZ, DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH und Fraunhofer UMSICHT.
- [15] Springer Frank, et al. Koordinierter Schlussbericht – Zusammenfassung für das Projekt „Digitalisierung von energieeffizienten Quartierslösungen in der Stadtentwicklung mit intelligenten Fernwärme-Hausanschlusstationen – iHAST (Phasen 1–2)“. Frankfurt, Dresden, Cottbus. Stuttgart: AGFW, TU Dresden, BTU Cottbus, IER Stuttgart; 202
- [16] AGFW 2022: Effizienz & KWK. Zugriff am 04.11.2022: www.agfw.de/energiewirtschaft-recht-politik/energiewende-politik/effizienz-kwk
- [17] LANUV 2021: Potenzialstudie Kraft-Wärme-Kopplung – Fachbericht 116. Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (LANUV), Recklinghausen 2021 www.lanuv.nrw.de/publikationen/details?tx_cartproducts_products%5Bproduct%5D=1079&cHash=10d4ec3d1bce3d396d38cb6c85d2379c

Wärmenetz-gekoppelte Speicherung im tiefen Untergrund

Forschungsinfrastrukturen, Speicherpotenziale und Netzintegration



KIT
Prof. Dr. Eva Schill
eva.schill@kit.edu

Dr. Simon Waczwicz
simon.waczwicz@kit.edu

Prof. Dr. Thomas Kohl
thomas.kohl@kit.edu

Kai Stricker
kai.stricker@kit.edu

Fraunhofer IEG
Prof. Dr. Rolf Bracke
rolf.bracke@ieg.fraunhofer.de

GFZ
Prof. Dr. Ingo Sass
ingo.sas@gfz-potsdam.de

UFZ
Dr. Karsten Rink
karsten.rink@ufz.de

Eine klimaneutrale Gesellschaft erfordert Energie-wendekonzepte mit steigenden Anteilen erneuerbarer Energien. Derzeit stammt ein großer Anteil des erneuerbaren Stroms aus fluktuierenden und nicht auf den Bedarf abgestimmten Quellen und benötigt daher große Speicherkapazitäten. Die chemische Speicherung in Batterien ist begrenzt, aber der tiefe Untergrund bietet ausreichend Kapazität zur Speicherung erneuerbaren Gases. Im Jahr 2012 befanden sich 24% des europäischen Gasspeichervolumens, d. h. 23 Mrd. m³, in Deutschland. Davon waren 47% in Kohlenwasserstoffspeichern und weitere 2% in Aquiferen untergebracht [1].

Die mengenmäßig größte Herausforderung bei der Reduzierung der energiebedingten CO₂-Emissionen liegt jedoch mit über 50% im Wärmesektor. In diesem stellt vor allem auch die Diskrepanz zwischen Energieangebot und nachfrage eine weitere zentrale Herausforderung dar und erfordert Energiepuffersysteme mit großer Kapazität [2,3]. Geothermische Energietechnologien ermöglichen sowohl die Wärme-gewinnung als auch die Energiespeicherung. Bereits heute gibt es zahlreiche Speicheranwendungen, insbesondere in oberflächennahen unterirdischen Systemen, die von Warmwasserspeichern über Kiesgruben bis hin zu Erdwärmesonden reichen [4].

Am weitesten verbreitet sind sogenannte BTES-Systeme (Thermische Energiespeicherung im Bohrloch), bei denen in der Regel der Wärmepumpenkreislauf umgekehrt wird, um überschüssige Wärme im geschlossenen Kreislauf über Erdwärmesonden zu speichern [5,6], und ATES-Systeme (Thermische Energiespeicherung im Aquifer), die Wärme speichern und zurückgewinnen, indem sie die hohe Durchlässigkeit der flachen Grundwasserschichten nutzen [2,7]. Diese Systeme sind Stand der Technik und werden in einer Vielzahl von privaten und öffentlichen Gebäuden eingesetzt. Weltweit sind >2800 ATES-Systeme in Betrieb, hauptsächlich in den Niederlanden, die mehr als 2.5 TWh pro Jahr für Heiz- und Kühlzwecke liefern [8,9]. Ihre Betriebstemperaturen liegen typischerweise bei T < 50°C und

decken damit hauptsächlich den Bedarf in individuellen Privathaushalten ab. Wasserbasierte Fernwärme in urbanen Räumen bzw. industrielle Prozesswärme mit T > 100°C können über diese Speicher nicht unterstützt werden [10,11].

Die Hochtemperatur-ATES (HT-ATES) werden in tiefen Reservoirs betrieben und greifen somit nicht in die oberflächennahen Grundwasserhorizonte ein. Sie ermöglichen die Verlagerung großer Mengen überschüssiger Wärme in kühlere Winterperioden [12]. Bei einem gemeinsamen Betrieb mit einer tiefen geothermischen Quelle können sie dazu beitragen, dass die Durchflussraten in den einzelnen Bohrungen geringer ausfallen und das tiefe geothermische System mit konstanten Durchflussraten betrieben werden kann. Dadurch können Umweltrisiken (z. B. induzierte Seismizität) vermieden werden. Damit eignen sich HT-ATES insbesondere auch für den urbanen Raum [13,14]. Erste Prototypen mit Speichertemperaturen T > 50°C sind derzeit in Betrieb bzw. wurden aus unterschiedlichen Gründen wieder eingestellt (► *Tabelle 1*).

Holstenkamp et al. [16] beschreiben die Bedingungen und Erfahrungen der beiden deutschen Systeme im Berliner Reichstag und in Neubrandenburg und betonen den Bedarf an weiterer Forschung.

Der ATES Neubrandenburg zeigte bis 2019 eine sehr gute Leistung. Wie vor dem ATES-Betrieb wird dieses Reservoir derzeit als konventionelles hydrothermales Aquifersystem betrieben. Die Temperatur ist dabei immer noch deutlich höher als die ursprüngliche Grundwasserleitertemperatur. Der Speicher befindet sich noch in der Entnahmephase. Dies wird voraussichtlich bis zur Heizperiode 2023/24 andauern. Der Grund für die Rückkehr zu einer konventionellen hydrothermalen Aquifernutzung ist der geringe Wärmeüberschuss im Sommer.

Der Speicher des Reichstages in Berlin ist prinzipiell betriebsbereit. Aufgrund von Änderungen im Energiemanagement des Gebäudes im Vergleich zur Planung und Auslegung des Speichers kann dieser nicht wie geplant betrieben werden.

Lokation	Speichertemperatur T (°C)	TDSFluid (g/L)	Tiefe (m)	Betriebsjahre
Rostock-Brinkmanshohe (D)	50		13–27	seit 2000
Middenmeer (NL)	92	16	360–383	seit 2021
Reichstag Berlin (D)	6 (60)	29	60 (320)	seit 1999 (–2018)
Neubrandenburg (D)	87	130	1250	2005–2019
Utrecht (NL)	90		220–260	1991–1999
Hooge Burch Zwammerdam (NL)	90		130–150	1998–2009

Tabelle 1

Wärmespeicherung für Temperaturen T > 50°:
Übersicht über Prototypen

Vergleichbar zu den Möglichkeiten der Gasspeicherung in Kohlenwasserstoffreservoirs und Aquiferen, ist eine Hochtemperatur-Wärmespeicherung im Untergrund beispielsweise in „ausgeförderten“ Kohlenwasserstoff-Lagerstätten bzw. in deren wassergesättigten Randbereichen (Aquiferen) möglich [15]. Sticker et al. [15] zeigen, dass in den tertiären Kohlenwasserstofflagerstätten des Oberrheingrabens (ORG) in Abhängigkeit von der Durchlässigkeit der Lagerstätte Volumina von circa 155.000 m³ Wasser bei 140 °C innerhalb von sechs Monaten über Dubletten-systeme injiziert werden können. Dies entspricht einem Speicherpotenzial von etwa 12 GWh_{th}. Der ORG bietet aufgrund seiner relativ hohen Temperaturen von 130–200 °C in relevanten Reservoirtiefen von 2–5 km Tiefen besonders günstige Bedingungen als Wärmequelle für wasserbasierte Netze. Diese

Quellen gehen mit einem hohen Wärmebedarf in diesem dicht besiedelten Gebiet einher. Zusätzlich und als Konsequenz dieser thermischen Anomalien bietet der ORG eine signifikante Anzahl von Kohlenwasserstoff- und Geothermieexploration hat dazu geführt, dass der ORG geowissenschaftlich intensiv untersucht ist. Die zahlreichen „ausgeförderten“ und teilweise noch im Betrieb befindlichen Kohlenwasserstofffelder sind bewährte Speicher, die durch ihre Tiefe, Geometrie und Lagerstätteneigenschaften gut charakterisiert sind [16–18]. Zahlreiche betrieblich bedingte Injektionen von Wasser haben ebenfalls gezeigt, dass induzierte Seismizität und die Umweltauswirkungen während der Förderung minimal sind. Diese natürlichen Speicher können daher ideale Standorte für HT-ATES darstellen.

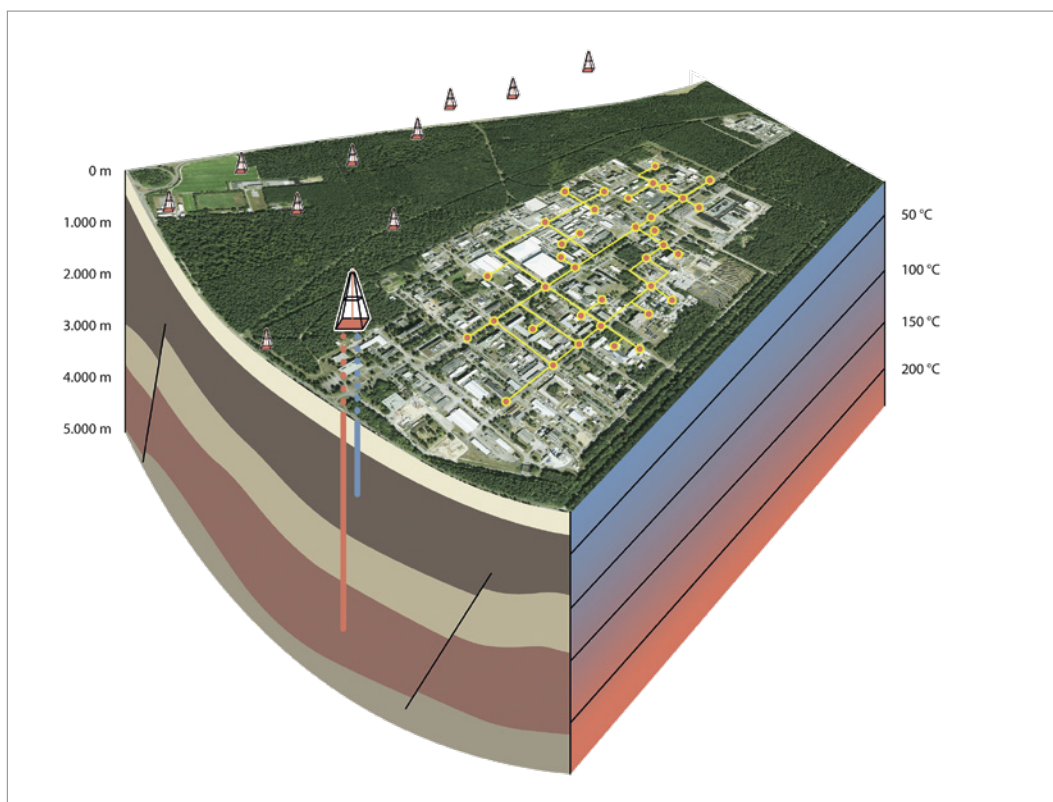


Abbildung 1

Geowissenschaftliche Infrastruktur DeepStor am KIT Campus Nord:

Gesamtkonzept der Bewirtschaftung des tiefen Untergrundes ausgehend vom erprobten natürlichen Speicher des Erdölfeldes Leopoldshafen (kl. Bohrtürme).

blaue Bohrung: Erschließung des tiefen HT-ATES in ca. 1300 m Tiefe

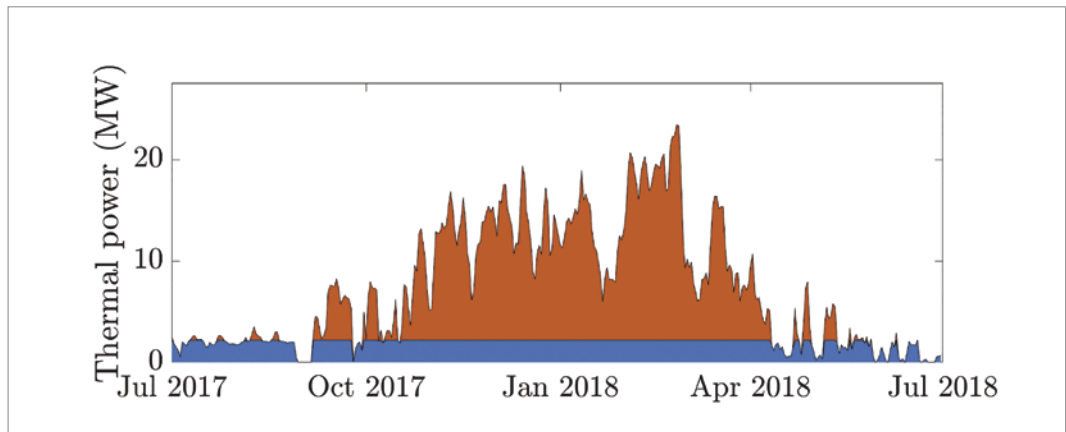
rote Bohrung: Erschließung des tiefen geothermischen Systems in circa > 3000 m Tiefe zur Wärmeabgewinnung.

gelb: das bestehende Wärmenetz des Campus

(Quelle: KIT)

Abbildung 2a
**Simulationsszenario
 – Wärmeversorgung
 durch KWK und Kessel**

(Quelle: nach Zwickel
 et.al. 2022 [25])



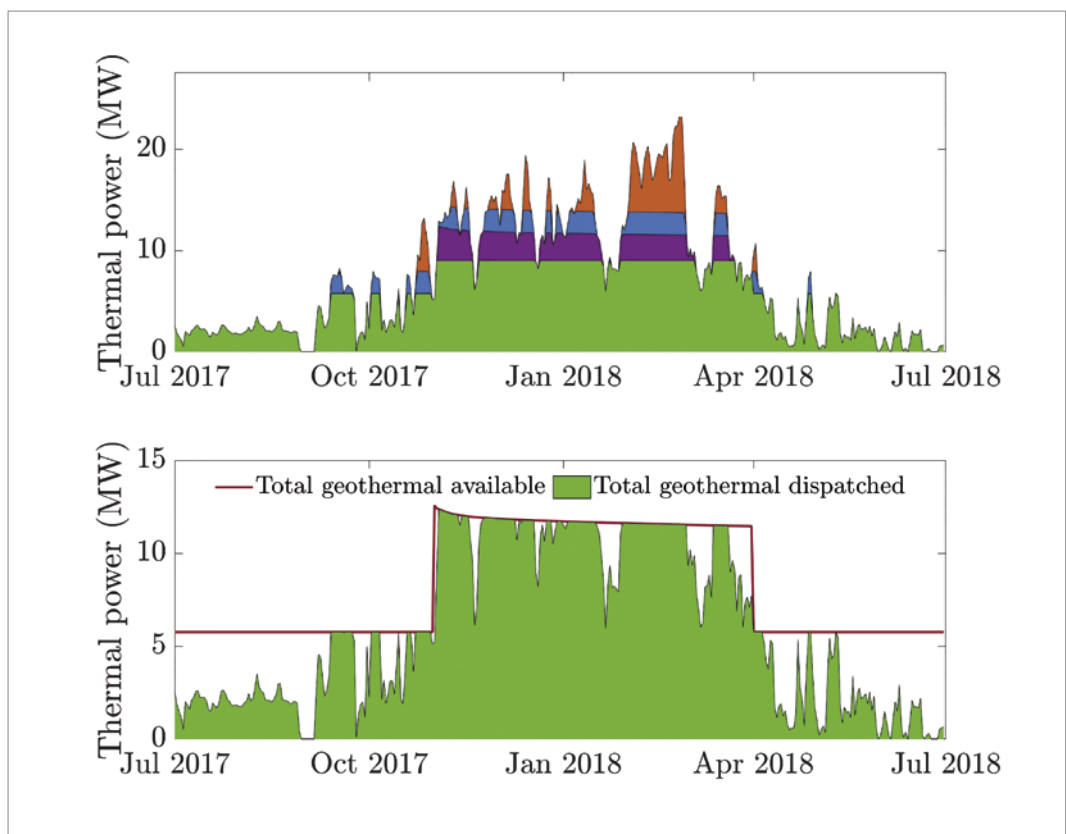
Um die derzeitigen Temperaturgrenzen (► *Tabelle 1*) zu überwinden, wurde die geowissenschaftliche Infrastruktur DeepStor am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) für hydraulische, thermische und chemische Experimente bei Temperaturen von bis zu 140°C konzipiert (► *Abbildung 1*). Diese Experimente werden im wassergesättigten Randbereich des ehemaligen Ölfelds Leopoldshafen durchgeführt. Der Aufbau als skalierbares Multispeichersystem ermöglicht bei erfolgreicher Demonstration in einer zweiten Phase die Erweiterung der Infrastruktur und die Einbindung in das Fernwärmenetz des KIT-Campus mit einer Vorlauftemperatur von 110°C. Erneuerbare Wärmequellen befinden sich in einem tiefen geo-

thermischen System unter dem Campus [19] (► *Abbildung 1*). In der nahe gelegenen Bohrung Leopoldshafen-20 wurden in 3000 m Tiefe Temperaturen von etwa 170°C gemessen. Zusätzlich stehen auf dem KIT-Campus die Bioliq-Anlage [20] und das Niedertemperaturkraftwerk MoNiKa [21] als Wärmequellen zur Verfügung.

Eine Risikobewertung zeigt zwei dominierende technische Risiken für HT-ATES-Systeme. Das Explorationsrisiko und das Risiko von Ablagerungen und Verstopfungen werden als "mittel" eingestuft, können aber bei tieferen Lagerstätten (>1000 m) noch höher sein. Für die meisten der aufgegebenen HT-ATES-

Abbildung 2b
**Simulationsszenario
 – Wärmeversorgung
 durch KWK, Kessel,
 Erdwärmanlage und
 HT-ATES mit einer
 Pump-Rate von 10 L/s**

(Quelle: nach Zwickel
 et.al. 2022 [25])



Standorte waren Scaling (Ausfällungen) und Clogging (Partikelanreicherungen) entscheidende Risiken mit relativ hoher Schwere und Eintrittswahrscheinlichkeit. Für den Bau und den Betrieb eines produktiven Speichersystems ist eine Analyse und Prognose der sich verändernden Geochemie und ihrer Auswirkungen auf die Porosität und Permeabilität des Reservoirs erforderlich. Saisonale Schwankungen in der Produktion, die HT-ATES-Systeme von tiefen geothermischen Produktionsstätten unterscheiden, und die hydrochemische Kinetik in den Reservoirs sind nahezu unerforscht. Verstopfungen wurden auch in einem HT-ATES-System an der TU Delft aufgrund der Ausfällung von Karbonaten bei der Injektion von heißem Wasser in das Reservoir festgestellt [22]. Bei Untersuchungen von HT-ATES-Systemen in den Niederlanden wurde Verstopfung, insbesondere bei hohen Temperaturen, als ein entscheidendes Problem erkannt [23]. Die Auflösung und Ausfällung von Mineralien im Reservoir und in der Oberflächenanlage sowie die Reaktivierung von Tonpartikeln im Reservoir gehören damit zu den kritischsten Herausforderungen bei der Installation und dem Betrieb von DeepStor [24].

Das KIT plant die Umstellung seiner Energieversorgung von fossil auf CO₂-neutral bis 2030. Aufgrund der optimalen geothermischen Bedingungen kann die Geothermie in diesem integrierten strategischen Rahmen die wichtigste Technologie zur Unterstützung der Wärmeerzeugung sein. Derzeit wird die Grundlast der Wärmeversorgung des bestehenden Wärmenetzes der zweiten Generation durch ein Blockheizkraftwerk erzeugt. Die Spitzen des Wärmeverbrauchs werden durch einen mit Erdgas betriebenen Heizkessel abgedeckt. Zusätzlich produzieren mehrere Forschungseinrichtungen überschüssige Wärme und speisen diese unregelmäßig in das Netz ein. Das Netz besteht aus drei Hauptleitungen, der Süd-, Nord- und Zentraleitung, die miteinander verbunden sind und so ein komplexes Maschennetz bilden. Eine Modernisierung des 17 km langen Netzes durch Senkung der Vorlauftemperaturen, die derzeit bei 110 °C und 0.6 MPa liegt, würde außerdem den Austausch der Wärmetauscher in mehr als 300 Gebäuden erfordern, was eine wirtschaftliche Herausforderung darstellt [25].

Erste Explorationsergebnisse zeigen ein hohes Potenzial für die geothermische Wärmeerzeugung entlang zweier großer Störungssysteme in permo-triassischen Sandsteinformationen in etwa 3300 m Tiefe. Thermalwasser mit einer Temperatur von circa 170 °C kann bereits bei moderaten Fließgeschwindigkeiten einen großen Teil des Wärmebedarfs des Campus decken. Die Erfahrung zeigt, dass moderate Fließgeschwin-

digkeiten eine Abschwächung der induzierten Seismizität ermöglichen. Eine große Herausforderung bei der Wärmeversorgung mit Geothermie sind die jahreszeitlichen Verbrauchsunterschiede, die von einer Grundlast von 2 MW im Sommer bis zu Spitzenwerten von mehr als 25 MW im Winter reichen. Zur Überwindung der saisonalen Schwankungen ist der Einsatz eines HT-ATES geplant. Überschüssige geothermische Wärmeproduktion im Sommer kann in ca. 1350 m Tiefe im wassergesättigten Randbereich des ehemaligen Ölfelds gespeichert werden. In diesem System kann im Winter Wasser mit Temperaturen von 120–130 °C produziert werden. Anhand von Simulationen mit optimierter Zeitplanung zeigt sich, dass die Umstellung der Wärmeversorgung von fossil auf Geothermie kombiniert mit einem HT-ATES (► *Abbildung 2*) die CO₂-Emissionen auf bis zu 15.000 t CO₂ pro Jahr reduzieren kann.

Eine derartige Umstellung erfordert nicht nur die Simulation gekoppelter THMC-Prozesse (thermische, hydraulische, mechanische und chemische Prozesse) in den porösen (HT-ATES) und geklüfteten (Tiefengeothermiesystem) Reservoirs, sondern auch die Nutzung von gemessenen Daten für die Modellierung und einen Vergleich mit den erzeugten Simulationsergebnissen.

Visualisierung von Messungen und Simulationen im Kontext mit erhobenen Daten dienen auch der Interaktion mit der Öffentlichkeit und Stakeholdern. Denn neben den oben dargelegten technischen Herausforderungen ist die Akzeptanz beider Systeme (HT-ATES und Tiefengeothermie) eines der größten Hemmnisse in deren Entwicklung. In dieser Hinsicht könnten Gebiete, in denen früher Kohlenwasserstoffe gefördert wurden, sowohl die erforderlichen Lagerstättenbedingungen und das Wissen darüber als auch die lokale Erfahrung mit der risikoarmen Kohlenwasserstoffförderung seit mehr als 50 Jahren bieten.

Aufgrund der umfangreichen Produktionserfahrungen ist zu erwarten, dass der Speicherbetrieb in den weichen, tonreichen Sedimenten des Tertiärgesteins weitgehend aseismisch verläuft. Darüber hinaus ist eine niedrige Durchflussrate – viel niedriger als für die geothermische Stromerzeugung erforderlich – anwendbar, was das seismische Risiko, insbesondere für dicht besiedelte Gebiete, weiter verringert. Ein solches Konzept könnte auch ein perfektes Symbol für den Übergang von der kohlenwasserstoffbasierten Vergangenheit zu den erneuerbaren Energien in der Zukunft symbolisieren.

Fazit

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass der tiefe Untergrund enorme Potenziale sowohl für die Dekarbonisierung der Wärmeversorgung [26] als auch für den immer größer werdenden Bedarf an Energiespeichern bietet. HT-ATES könnten dabei in den für eine klimaneutrale Gesellschaft erforderlichen Speicherszenarien eine wichtige Rolle spielen, doch muss diese neue Technologie ihre Machbarkeit unter Beweis stellen und die notwendige öffentliche Akzeptanz finden.

Um diese Potenziale zu nutzen, entwickeln die Mitglieder des Forschungsverbundes Erneuerbare Energie (FVEE) Lösungen zur umweltgerechten Nutzung der Tiefengeothermie sowie der geobasierten energetischen und stofflichen Speicherung.

Notwendige nächste Schritte sind der Ausbau geologischer Porenspeicher für Wärme und energie-relevante Gase im TWh-Bereich sowie ein Markthochlauf geothermischer Technologien. Mit Hilfe von Forschungsbohrungen können neue Speichertechnologien, die ausgeförderte Kohlenwasserstoffspeicher nachhaltig nutzen und so eine kurzfristige Lösung zur heutigen Frage der Energiespeicherung darstellen, entwickelt werden.

Vor dem Hintergrund einer angestrebten Begrenzung des Anstiegs der globalen Mitteltemperatur auf deutlich unter 2°C gegenüber dem vorindustriellen Niveau ist eine Beschleunigung der Entwicklungen in der HT-ATES Technologie dringend notwendig.

Die FVEE Mitglieder streben dazu in den nächsten zwei bis drei Jahren folgende Ziele an:

- 1) Validierung der technischen Machbarkeit von Speichertechnologien in ausgeförderten Kohlenwasserstoffspeichern
- 2) Bewertung und Gewährleistung stabiler Reservoirigenschaften in salinen Aquiferen, um einen zyklischen und sicheren Belade- und Entladebetrieb umsetzen zu können
- 3) Entwicklung geobasierter Lösungen für hydrothermale Aquifere zur Deckung der Grund- und Mittellast in der Wärmeversorgung
- 4) Hochskalierung der Untergrundspeicherung im technischen Maßstab
- 5) Entwicklung von Lösungen im Co-Design mit der Öffentlichkeit und mit einem Citizen Science Projekt

Referenzen

- [1] WEG. Jahresbericht 2012, Zahlen und Fakten Wirtschaftsverband Erdöl- und Erdgasgewinnung e.V. 2012. Available online: <https://www.bveg.de/Erdgas/Erdgasspeicher/Speichervolumen-in-Deutschland> (accessed on 18 November 2020).
- [2] Lee, K.S. *Underground Thermal Energy Storage*; Springer: London, UK, 2013; ISBN 978-1-4471-4273-7.
- [3] Li, G. Sensible heat thermal storage energy and exergy performance evaluations. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2016, 53, 897–923, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.09.006>
- [4] Fleuchaus, P., Godschalk, B., Stober, I., Blum, P. Worldwide application of aquifer thermal energy storage—A review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2018, 94, 861–876, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.06.057>
- [5] Bär, K., Rühaak, W., Welsch, B., Schulte, D., Homuth, S., Sass, I. Seasonal High Temperature Heat Storage with Medium Deep Borehole Heat Exchangers. *Energy Procedia* 2015, 76, 351–360.
- [6] Rad, F.M.; Fung, A.S. Solar community heating and cooling system with borehole thermal energy storage—Review of systems. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2016, 60, 1550–1561.
- [7] Dickinson, J.S., Buik, N., Matthews, M.C., Snijders, A. Aquifer thermal energy storage: Theoretical and operational analysis. *Géotechnique* 2009, 59, 249–260.
- [8] Van Heekeren, V., Bakema, G. Country Update the Netherlands; World Geothermal Congress: Melbourne, Australia, 2015.
- [9] Fleuchaus, P., Godschalk, B., Stober, I., Blum, P. Worldwide application of aquifer thermal energy storage—A review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2018, 94, 861–876.
- [10] Fraunhofer ISI. Baseline Scenario of the Heating and Cooling Demand in Buildings and Industry in the 14 MSs until 2050. 2017. Available online: https://heatroadmap.eu/wp-content/uploads/2018/11/HRE4_D3.3andD3.4.pdf (accessed on 18 November 2020).
- [11] Sayegh, M.A., Jadwiszczak, P., Axcell, B.P., Niemierka, E., Brys, K., Jouhara, H. Heat pump placement, connection and operational modes in European district heating. *Energy Build.* 2018, 166, 122–144.

- [12] Sanner, B., Knoblich, K. Thermische Untergrundspeicherung auf Höherem Temperaturniveau: Begleitforschung mit Messprogramm Aquiferspeicher Reichstag. Schlussbericht zum FuE-Vorhaben 0329809 B; Justus-Liebig-Universität Giessen: Giessen, Germany, 2004.
- [13] Kabus, F., Richlak, U., Wolfgramm, M., Gehrke, D., Beuster, H., Seibt, A. Aquiferspeicherung in Neubrandenburg – Betriebsmonitoring über drei Speicherzyklen. Conf. Proc. Der Geotherm. 2008, 2008, 383–392.
- [14] Holstenkamp, L., Meisel, M., Neidig, P., Opel, O., Steffahn, J., Strodel, N., Lauer, J.J., Vogel, M., Degenhart, H.; Michalzik, D., et al. Interdisciplinary Review of Medium-deep Aquifer Thermal Energy Storage in North Germany. Energy Procedia 2017, 135, 327–336, <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.524>.
- [15] Stricker, K.; Grimmer, J.C.; Egert, R.; Bremer, J.; Korzani, M.G.; Schill, E.; Kohl, T. The Potential of Depleted Oil Reservoirs for High-Temperature Storage Systems. Energies 2020, 13, 6510, <https://doi.org/10.3390/en13246510>
- [16] Böcker, J. Petroleum System and Thermal History of the Upper Rhine Graben: Implications from Organic Geochemical Analyses, Oil-Source Rock Correlations and Numerical Modelling. Ph.D Thesis, RWTH Aachen, Aachen, Germany, 2015.
- [17] Grandarowski, G. Possibilités d'injection en Couches Profondes d'événements Industriels. Etude de Quelques Réservoirs Sableux et Gréseux Dans les Formations Tertiaires du Nord. de l'Alsace; Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM): Strasbourg, France, 1971. Energies 2020, 13, 6510 24 of 26
- [18] Bruss, D. Zur Herkunft der Erdöle im Mittleren Oberrhein Graben und ihre Bedeutung für die Rekonstruktion der Migrationsgeschichte und der Speichergesteinsdiagenese. Ph.D. Thesis, Forschungszentrum Jülich/Universität Erlangen-Nürnberg: Jülich, Germany, 2000.
- [19] Baillieux, P., Schill, E., Edel, J.-B., Mauri, G. Localization of temperature anomalies in the Upper Rhine Graben: Insights from geophysics and neotectonic activity. Int. Geol. Rev. 2013, 55, 1744–1762, <https://doi.org/10.1080/00206814.2013.794914>
- [20] Dahmen, N., Abeln, J., Eberhard, M., Kolb, T., Leibold, H., Sauer, J., Stapf, D., Zimmerlin, B. The bioliq process for producing synthetic transportation fuels. Wiley Interdisciplinary Rev. Energy Environ. 2016, 6, <https://doi.org/10.1002/wene.236>
- [21] Vetter, C., Wiemer, H.J. Dynamic Simulation of a Supercritical ORC using Low-Temperature Geothermal Heat. In Proceedings of the World Geothermal Congress 2015, Melbourne, Australia, 19–25 April 2015; 11.
- [22] Hacking, P. The Suitability of a High Temperature Aquifer Thermal Energy Storage on the TU-Delft Campus. Bachelor's Thesis. Delft University of Technology, Delft, The Netherlands, 2017.
- [23] Jeon, J.-S., Lee, S.-R., Pasquinelli, L., Fabricius, I.L. Sensitivity analysis of recovery efficiency in high-temperature aquifer thermal energy storage with single well. Energy 2015, 90, 1349–1359, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.06.079>
- [24] Banks, J., Spencer, P., Grimmer, J., Bauer, F., Schill, E. Geochemical Changes Associated with High-Temperature Heat Storage at Intermediate Depth: Thermodynamic Equilibrium Models for the DeepStor Site in the Upper Rhine Graben, Germany. Energies 2021, 14, 6089. <https://doi.org/10.3390/en14196089>
- [25] Zwickel, P., Bauer, F., Schätzler, K., Steiner, U., Waczowicz, S., Hagenmeyer, V., Schill, E. Integrated concept of local heat transition using geothermal heat production, aquifer storage and optimal scheduling of distribution network. European Geothermal Congress 2022, Berlin, Germany | 17–21 October 2022, www.europeangeothermalcongress.eu
- [26] Bracke, R., Huenges, E., Acksel, D., Amann, F., Bremer, J., Bruhn, D., Budt, M., Bussmann, G., Görke, J.-U., Grün, G., Hahn, F., Hanßke, A., Kohl, T., Kolditz, O., Regenspurg, S., Reinsch, T., Rink, K., Sass, I., Schill, E., Schneider, C., Shao, H., Teza, D., Thien, L., Utri, M., Will, H. ROADMAP TIEFE GEOTHERMIE FÜR DEUTSCHLAND. Handlungsempfehlungen für Politik, Wirtschaft und Wissenschaft für eine erfolgreiche Wärmewende. <https://doi.org/10.24406/ieg-n-645792>

Wärmepumpen – aktuelle Entwicklungen und Lösungen für den Gebäudebestand



Fraunhofer ISE
Dr. Constanze Bongs

Dr. Hannes Fugmann
hannes.fugmann
@ise.fraunhofer.de

Fraunhofer IEE
Dr. Michael Krause
michael.krause@iee.fraunhofer.de

ISFH
Niklas Kracht
n.kracht@isfh.de

In Wissenschaft und Politik besteht inzwischen weitgehend Einigkeit, dass eine schnelle Umstellung von fossilen Heizsystemen auf klimagerechtere Technologien der Wärmeversorgung notwendig ist. Neben dem Ausbau und der Dekarbonisierung von Wärmenetzen sind Wärmepumpen ein entscheidender Hebel für erfolgreichen Klimaschutz in Gebäuden. 62% des Gebäudebestands wurde vor 1979 und damit weitestgehend vor der ersten Wärmeschutzverordnung (1977) errichtet [1]. Diese Gebäude verursachen rund zwei Drittel des Endenergieverbrauchs im Gebäudesektor [2]. Es ist also deutlich: Klimaschutzziele sind nicht ohne eine Umstellung der Wärmeversorgung im Gebäudebestand zu erreichen.

Ein Blick auf die Altersstruktur der Anlagentechnik zeigt, dass für über 40% der Wärmeerzeuger mit einem Alter von über 20 Jahren ein baldiger Austausch ansteht. Das mittlere Alter der Anlagentechnik liegt bei 17 Jahren [3], die jährlichen Austauschraten bei ca. 2,5–3% des Anlagenbestands und somit höher als die Sanierungsraten mit ca. 1%. Daraus lässt sich ableiten, dass ein hoher Anteil des Erzeugeraustauschs ohne flankierende Maßnahmen zur Energiebedarfsreduktion am Gebäude durchgeführt wird. Dabei wurden in den vergangenen Jahren im Gebäudebestand bei der Heizungsmodernisierung immer noch sehr viele alte Heizkessel durch neue Gas- und Ölkessel ersetzt, die trotz Brennwerttechnik hohe CO₂-Emissionen über viele Jahre festschreiben (Lock-In-Effekt). Die Klimaschutzziele im Gebäudesektor könnten bei Fortführung der aktuellen Praxis nicht erreicht werden.

Aktuell ist die Umstellung auf Wärmepumpensysteme im Bestand stärker in den Fokus gerückt. Ein Blick auf die Marktzahlen zeigt, dass der Absatz an Wärmepumpen im Bestand bereits vor dem Ukraine-Krieg an Fahrt aufgenommen hat. In Deutschland lag die Anzahl abgesetzter Wärmeerzeuger im Bestand in 2020 in der Größenordnung von 800.000 Wärmeerzeugern, von denen ca. 680.000 noch Gasgeräte waren [3]. Jedoch wurden bereits seit 2020 mehr

Wärmepumpen im Bestand als im Neubau abgesetzt (2021: 100.000 Wärmepumpen im Bestand, ca. 55.000 Wärmepumpen im Neubau) [4]. Die aktuell benannte Zielmarke der Bundesregierung von jährlich 500.000 installierten Wärmepumpen (ab 2024) bedeutet einen weiteren massiven Anstieg von Wärmepumpen im Bestand.

Herausforderungen für Wärmepumpen in Mehrfamilienbestandsgebäuden

Dass Wärmepumpen auch im Bestand mit guter Effizienz eingesetzt werden können, konnte das Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme (ISE) schon in umfangreichen Feldtests mit dem Schwerpunkt auf Ein- und Zweifamiliengebäuden nachweisen. So wurden im Projekt WPSmart im Bestand (FKZ 03ET1272A) 29 Außenluft- und 12 Erdreich-Wärmepumpen im Feld mittels eines wissenschaftlichen Monitorings analysiert. Im ausgewerteten Zeitraum Juli 2018 bis Juni 2019 haben die 29 untersuchten Außenluft-Wärmepumpen Jahresarbeitszahlen (JAZ) von 2,5 bis 3,8 erreicht. Der Mittelwert lag bei 3,1. Für die zwölf Erdreich-Wärmepumpen wurden JAZ zwischen 3,3 und 4,7, bei einem Mittelwert von 4,1 ermittelt.

Hingegen ist der Einsatz von Wärmepumpen in Mehrfamilienbestandsgebäuden aktuell in vielerlei Hinsicht noch Neuland. Hier liegen besondere Randbedingungen und Herausforderungen vor. Technische Herausforderungen ergeben sich aus der höheren erforderlichen Leistung des Wärmeerzeugers und der Verortung der Gebäude auch in Quartieren mit dichter Bebauung. Beide Aspekte führen dazu, dass der Erschließung der Umweltwärmequelle eine hohe Bedeutung zukommt. Weiter erfolgt die Wärmeübergabe in Mehrfamilienbestandsgebäuden zum Großteil mit Heizkörpern (auch älteren Datums), die häufig mit hohen Vorlauftemperaturen betrieben werden. Trinkwarmwasser wird ebenfalls bei hohen Temperaturen bereitgestellt (Legionellenschutz).

Wärmequelle	Wärmepumpe	Wärmesenke
Herausforderungen		
<ul style="list-style-type: none"> • Erschließung der Wärmequelle • Luft-WP: Schallemission und Aufstellort • Sole-WP: Flächenverfügbarkeit für Bohrung 	<ul style="list-style-type: none"> • Umstellung auf klimafreundliche Kältemittel (z.B. Propan) • Bereitstellung höherer Temperaturen bei guter Effizienz • größere Leistungsklassen 	<ul style="list-style-type: none"> • Absenkung von Systemtemperaturen • Weiternutzung von Bestands hydraulik • Nutzerakzeptanz für geringere Vorlauftemperaturen
Lösungsansätze		
<ul style="list-style-type: none"> • Quellenerschließung über die Gebäudehülle • PVT-Kombikollektoren • Multivalente Quellensysteme • bivalente Systeme 	<ul style="list-style-type: none"> • Weiterentwicklung von Propan-Wärmepumpen und Sicherheitskonzepten • Kaskadierung von Wärmepumpen 	<ul style="list-style-type: none"> • selektiver Heizkörperaustausch und hydraulischer Abgleich • dezentrale Frischwasserstationen oder zentrale Frischwasserstation mit Ultrafiltration

Tabelle 1

Herausforderungen und Lösungsansätze für Wärmepumpen in Bestandsgebäuden, insbesondere im Geschosswohnungsbau

Daher ergeben sich die zwei thematischen Bereiche „Quellenerschließung“ und „Systemtemperaturen“ als Schwerpunkte in der Entwicklung neuer Lösungen auf systemischer und auf Geräteebene. Die im Folgenden dargestellten Arbeiten der FVEE-Partnerinstitute fokussieren die Themenfelder der Quellenerschließung sowie der Weiterentwicklung von Wärmepumpentechnik mit klimafreundlichen Kältemitteln.

Kompakte Wärmepumpenkältekreise mit dem Kältemittel Propan

Wärmepumpen-Hersteller arbeiten derzeit sowohl an Kostensenkungen als auch an nachhaltigen Kältemitteln für ihre Geräte. Im Projekt LC150 (»low charge 150 g«) (FKZ 03EN4001A) entwickeln das Fraunhofer ISE und ein Konsortium aus Wärmepumpenherstellern einen standardisierten und kältemittelreduzierten Propan-Kältekreis für Sole-Wasser-Wärmepumpen (► *Abbildung 1a*). Propan zeichnet sich durch sehr gute thermodynamische Eigenschaften und ein geringes Erderwärmungspotenzial aus. Da es aber brennbar ist, wird eine möglichst geringe Propanmenge angestrebt. In mehr als 5000 Messungen wurden hierfür bereits zwei Dutzend Kältekreisprüflinge an einer weitgehend automatisierten Messinfrastruktur im Zentrum für Wärme- und Kältetechnologien des Fraunhofer ISE vermessen. Ziel ist, die beste Kombination von Verdampfer, Kondensator und Verdichter zu identifizieren und Potenziale für eine weitere Kältemittelreduktion zu erschließen. In der angestrebten Größenordnung von sechs bis zehn Kilowatt Heizleistung (für Ein-/Zweifamilienhäuser) gelang es bereits mit mehreren Prüflingen einen »Seasonal Coefficient of Performance« (SCOP) zu erreichen, der die Anforderungen

des Bundesamts für Wirtschaft und Ausführungkontrolle (BAFA) zur Förderfähigkeit erfüllt. Der aktuell beste Prüfling erzielt mit einer Kältemittelmenge von 124 g eine Heizleistung von 12,5 kW bei einer saisonalen Effizienz von 4,7 (SCOP). Daraus ergibt sich eine spezifische Kältemittelfüllmenge von ~10 g/kW. Handelsübliche Wärmepumpen liegen bei etwa 60 Gramm Propan pro Kilowatt. Die Erkenntnisse aus dem Projekt LC150 zur Reduktion des Kältemittels und dem Umgang mit brennbaren Kältemitteln nutzt das Fraunhofer ISE auch für die laufende Entwicklung von sicheren Wärmepumpen mit größeren Leistungen, Luft als Quelle und höheren Temperaturen für Industrieenanwendungen (► *Abbildung 1b*).

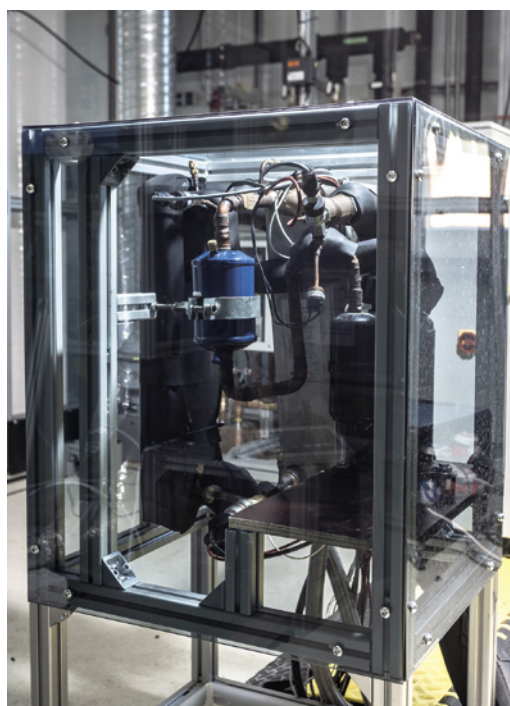
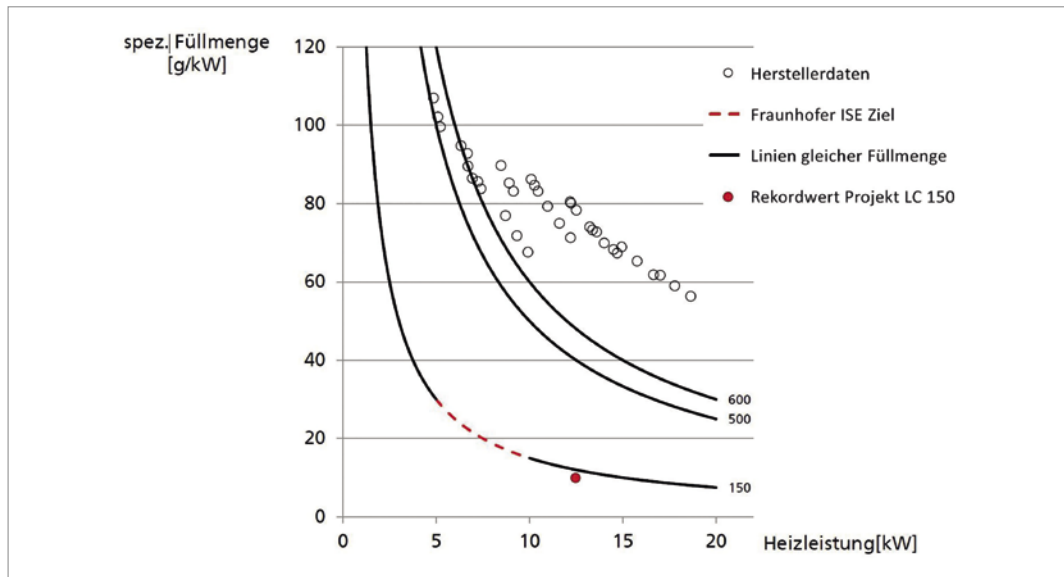


Abbildung 1a

Propan-Kältekreis mit geringer Füllmenge

(Quelle: Fraunhofer ISE)

Abbildung 1b
Einordnung der Füllmengenreduktion im Vergleich zu marktverfügbaren Geräten
 (Quelle: Fraunhofer ISE)



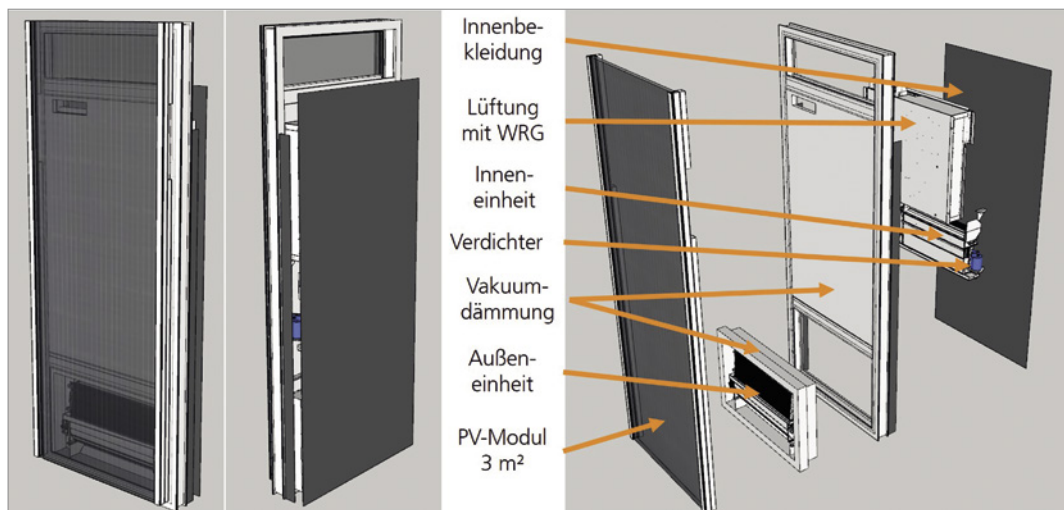
Dezentrale Integration von Kleinstwärmepumpe in vorgefertigte Fassadenelemente

Einen vollständig dezentralen Ansatz zur Integration von Wärmepumpen in Gebäude verfolgt das Forschungsprojekt „EE-Modul“ (BWMK FKZ 03ET1530), in dem zur individuellen Versorgung der Räume eines Gebäudes Kleinstwärmepumpen zum Einsatz kommen. Unter Federführung des Fraunhofer-Instituts für Energiewirtschaft und Energiesystemtechnik (IEE) in Kooperation mit dem Fraunhofer-Institut für Bauphysik (IBP) wurde hierzu mit industriellen Partnern ein neuartiges Fassadensystem entwickelt, in welchem die anlagentechnischen Funktionen Heizen, Kühlen, Lüften und Energieerzeugen in einer elementierten Modulfassade vereint sind. Die technischen Funktionen müssen somit nicht wie üblich vom Gebäudekern ausgehend bereitgestellt werden, sondern können direkt in die Gebäudehülle integriert werden

und kommen, abgesehen von einer Stromleitung, vollständig ohne weitere Versorgungsleitungen aus. Kern der Entwicklung ist ein standardisiertes Fassadensystem, welches um ein anlagentechnisches Modul (► *Abbildung 2*), erweitert wird, welches ein Lüftungssystem, eine Luft/Luft-Wärmepumpe und ein Photovoltaikpaneel enthält.

Die neu entwickelte Demofassade wurde am Teststand des Fraunhofer IBP sowohl hinsichtlich des Bauablaufs als auch hinsichtlich energetischer, raumklimatischer und akustischer Aspekte untersucht. Die einjährige Messphase hat sowohl in Bezug auf die Leistungsbereitstellung als auch auf die Arbeitszahlen gute Ergebnisse gezeigt. Das System zeichnet sich aufgrund des hohen Vorfertigungsgrades durch eine hohe Kostensicherheit (Investment, Betrieb) sowie einen beschleunigten Bauprozess (geringerer Abstimmungsaufwand, weniger Arbeiten im Inneren des Gebäudes) aus.

Abbildung 2:
EE-Modulfassade:
 Komponenten des
 Technischelements
 (Quelle: Fraunhofer IEE)



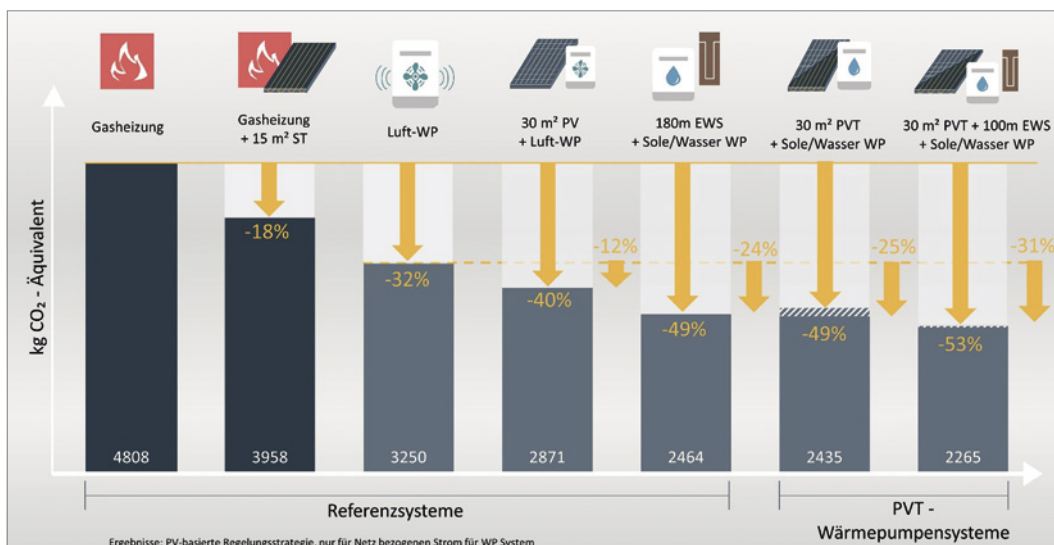


Abbildung 3
CO₂-Emissionen der verschiedenen simulierten Wärmeerzeugungsanlagen
(Quelle: ISFH)

PVT-Kombikollektoren zur Quellenerschließung über die Gebäudehülle

Das BMWK-geförderte Projekt „integrATe“ (BMWK FKZ 03EGB0023) untersucht PVT-Kollektoren (photovoltaisch-thermische Kollektoren) mit Wärmepumpen, um die Verbreitung dieses attraktiven Energieversorgungssystems für den Gebäudesektor zu erhöhen. PVT-Kollektoren liefern gleichzeitig Wärme und Strom für den Wärmepumpenbetrieb. Diese können sowohl als bauliche Einheit als auch als Clamp-On-Wärmetauscher bei bestehenden PV-Anlagen nachgerüstet werden. Im Rahmen des Projekts werden zehn Demonstrationsanlagen überwacht. Neben dem Monitoring werden auch detaillierte Simulationsstudien zu verschiedenen Energieversorgungssystemen durchgeführt. In der Simulationsstudie des ISFH wurden zwei

PVT-Wärmepumpensysteme mit verschiedenen Referenzsystemen für die Energieversorgung eines Bestandseinfamilienhauses mit einem Gesamtheiz- und Warmwasserbedarf von 123 kWh/(m²·a) verglichen.

Die Ergebnisse sind in ► **Abbildung 3** grafisch dargestellt. Im Resultat weist der Gaskessel mit 4808 kg die höchsten CO₂-Emissionen auf. Die Luft-Wärmepumpe ist das Wärmepumpensystem mit einem CO₂-Ausstoß von 3250 kg, was einer Reduzierung von 32% im Vergleich zum Gaskessel entspricht. Die Kombination einer PV-Anlage mit der Luft-Wärmepumpe reduziert die Emissionen um 40% im Vergleich zum Gaskessel und um 12% im Vergleich zur Luft-Wärmepumpe ohne PV-Anlage. Ein noch höheres Potenzial zur CO₂-Reduktion besteht bei der Wärmeversorgung mit der Kombination PVT-Wärmepumpe.

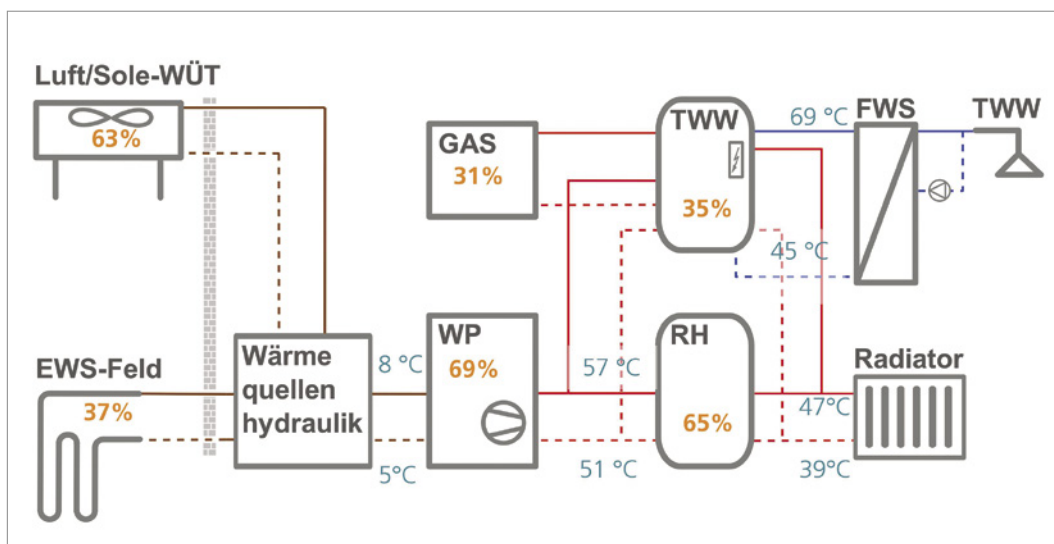
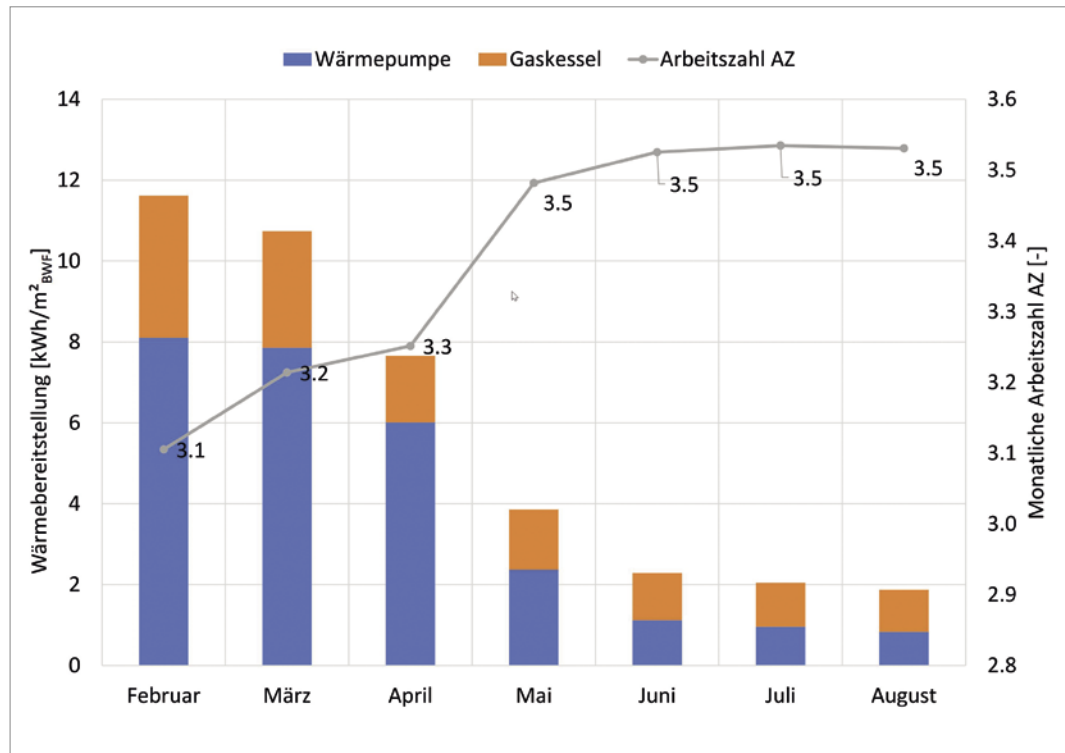


Abbildung 4a
Mehrquellen-Wärmepumpen-System:
Hydraulikschema (Temperaturen in blau = energetisch gewichtete Mitteltemperaturen)
(Quelle: Fraunhofer ISE)

Abbildung 4b
Mehrquellen-Wärmepumpen-System:
 Felddaten
 (Quelle: Fraunhofer ISE)



Diese erreicht eine CO₂-Einsparung von 49%, ebenso wie 180m Erdsonden mit Wärmepumpe. Im Allgemeinen bietet der PVT-Kollektor in Kombination mit einer Wärmepumpe ein erhebliches CO₂-Einsparungspotenzial und stellt eine attraktive Alternative zur luft- oder erdgekoppelten Wärmepumpe dar. Andererseits ist die PVT-Erdsonden-Wärmepumpen-Kombination nachweislich noch effizienter und kann die CO₂-Emissionen um bis zu 53% reduzieren.

Aus diesen Ergebnissen lässt sich schlussfolgern, dass PVT-Wärmepumpensysteme einen wichtigen Beitrag zur Reduktion von CO₂-Emissionen leisten können. Darüber hinaus kann durch die Kombination von PVT-Kollektoren und erdgekoppelten Wärmepumpensystemen die Erdwärmesonde kleiner dimensioniert werden bei gleichzeitig geringeren Emissionen. Es ist auch möglich, die Erdwärmesonde ganz zu ersetzen, wenn diese zum Beispiel nicht errichtet werden darf.

Mehrquellensystem für Wärmepumpen im Geschosswohnungsbau

Für den Einsatz im Geschosswohnungsbau wurde im Projekt HEAVEN (BMW FKZ 03ET1540) ein Mehrquellensystem zur Kombination der Wärmequellen Erdreich und Außenluft entwickelt und in einem Demonstrator in Karlsruhe-Durlach umgesetzt. Kernstück ist eine neu entwickelte Mehrquellen-Hydraulik mitsamt Regelungslogik.

Der systemische Ansatz adressiert das Problem der begrenzten Flächenverfügbarkeit in städtischen Wohngebieten. Im Vergleich zu einem System mit nur einer Wärmequelle wird der Flächenbedarf des Erdwärmeübertragers im vorliegenden Fall um 50% reduziert.

Im Demonstrator wird das Mehrquellen-WP-System von einem 91 kW_{th} Gasbrennwertkessel unterstützt und ist als bivalent paralleles System ausgelegt. Der Gasbrennwertkessel ist dabei für die Bereitstellung von Trinkwarmwasser oberhalb von 62°C und für die Bereitstellung von Heizwasser bei Außentemperaturen von unter -5°C vorgesehen.

► **Abbildung 4** zeigt die Auswertung des Demonstrators für das erste Betriebshalbjahr Februar – August 2022. Der Wärmebedarf für Raumwärme und Trinkwarmwasser wurde zu 69% von der Wärmepumpe gedeckt. Der Gaskessel war insbesondere für die Trinkwarmwassererzeugung zuständig. Die Mehrquellenhydraulik erzielt ganzjährig relativ hohe Quelltemperaturen. Dies führt trotz hoher Temperaturen der Wärmebereitstellung (Vorlauftemperatur für Raumwärme zwischen 55–60°C bei 0°C Außentemperatur) zu einer hohen Arbeitszahl des ersten Betriebshalbjahrs von 3,2. Für eine Skalierung und Übertragung der Ergebnisse auf Anlagen ohne wissenschaftliche Begleitung scheint vor allem eine Standardisierung von Komponenten, Hydraulik-schemen und Regelung erfolgsversprechend. [5]

Multivalente Quellenerschließung im Quartier: Lagarde-Campus in Bamberg

Den Quartiersansatz verfolgt die Quartiersentwicklung des Lagarde-Campus in Bamberg, in dem verschiedene Wärmequellen und Energieträger für die Versorgung eines Mischquartiers bestehend aus Neu- und Bestandsbauten genutzt werden.

Die Neubauten werden zukünftig über dezentrale, an ein kaltes Nahwärmenetz angeschlossene Wärmepumpen beheizt. Als Wärmequellen dienen Erdsonden, Erdkollektoren sowie Abwasser.

Die Altbauten werden über ein Hochtemperaturnetz mit Fernwärme sowie mit über ein Blockheizkraftwerk (BHKW) erzeugter Nahwärme versorgt. Der erzeugte Strom von BHKW sowie PV-Anlagen wird über ein elektrisches Betriebsnetz für den Betrieb der Wärmepumpen genutzt. Das Forschungsprojekt Enable (BMW FKZ 03EN3061) untersucht am Beispiel dieses Quartiersversorgungskonzepts, wie eine sektorenübergreifende, optimierte Ansteuerung von Gebäude/Campus-Energiesystemen und eine Vermarktung von Flexibilität durch den Aufbau einer Informations- und Kommunikationstechnik (IKT) realisiert werden kann.

Literatur

- [1] Sachverständigenrat für Umweltfragen (SRU), Januar 2020, Berlin: Für eine entschlossene Umweltpolitik in Deutschland und Europa. Umweltgutachten 2020.
- [2] Deutsche Energie-Agentur: Der DENA-Gebäudereport 2016. Statistiken und Analysen zur Energieeffizienz im Gebäudebestand.
- [3] Deutsche Energie-Agentur: DENA Gebäude-report 2022. Zahlen, Daten, Fakten.
- [4] Bundesverband Wärmepumpe 2022: Marktzahlen aus der BWP/BDH-Absatzstatistik und Baufertigstellungsstatistik.
- [5] Bongs, C.; Wapler, J.; Metz, J.; Miara, M.; Lämmle, M.: Wärmeversorgung im Geschosswohnungsbau mit Wärmepumpen, nbau, Übersichtsaufsatz, Veröffentlichung online am 26.02.2023.
<https://www.nbau.org/2023/02/26/waermeversorgung-im-geschosswohnungsbau-mit-waermepumpen/>

Gebäudebestand der Zukunft – Smarte Energieeffizienz



CAE

Dr. Bastian Büttner
bastian.buettner
@cae-zeroarbon.de

DBFZ

Kerstin Würdinger
kerstin.wurdinger@dbfz.de

DLR

Dr. Martin Vehse
martin.vehse@dlr.de

FZ Jülich

Dr. Noah Pflugradt
n.pflugradt@fz-juelich.de

ISFH

Dr. Modar Yasin
yasin@isfh.de

IZES

Dr. Bodo Groß
gross@izes.de

Einleitung

Der Anteil des Gebäudesektors am Endenergieverbrauch Deutschlands bleibt anteilig seit Jahren auf nahezu konstantem Niveau. So entfielen in den Jahren 2015–2019 ca. 34 % und in den Jahren 2020 und 2021 etwa 36 % auf diesen Sektor [1] – ein Anstieg, der auch der Corona-Krise geschuldet ist. Den Anwendungen Wärme und zunehmend auch Kälte kommt dabei eine herausragende Rolle zu, wobei sich der darauf entfallende Endenergiebedarf in den letzten acht Jahren nur unwesentlich verringert hat. Ebenso weist der Anteil erneuerbarer Energien einen nur geringfügig wachsenden Trend auf 16 % in 2021 auf, wobei hier vornehmlich die Verfeuerung von Biomasse eingesetzt wird (► *Abbildung 1*). Dass die Verbrennung von Primärholz kritisch zu betrachten ist, wurde in der Renewable Energy Directive (RED III) auf europäischer Ebene diskutiert.

Es ist festzustellen, dass der Gebäudesektor die im Klimaschutzgesetz festgelegten Emissionsziele für 2020 und 2021 verfehlt hat [2], weshalb ein „Sofortprogramm Gebäude“ von den Ministerien BMWSB und BMWK vorgelegt wurde, das unter anderem eine Novelle des Gebäudeenergiegesetzes (GEG) vorantreibt.

Neben den Bestimmungen im GEG, hat auch die Gasmangellage infolge des Ukrainekriegs zu einem Umdenken bei den eingesetzten Heizsystemen im Neubausektor geführt, so dass sich der Anteil von Wärmepumpen in der Wärmebereitstellung von Januar bis März 2022 auf 50 % erhöht hat und dabei im Wesentlichen Gasheizungen verdrängt (► *Abbildung 2*). Allerdings ist der Rückgang von Fernwärme im Neubau, ebenso wie die sehr langsame Marktdurchdringung erneuerbarer Heizungen im Gebäudebestand als kritisch einzustufen.

Auch die EU hat sich mit der neuen Energy Performance of Buildings Directive („Fit for 55“) zum Ziel gesetzt, eine Sanierungswelle in Europa zu starten und gemäß der „Worst-First“-Strategie, die energetisch schlechtesten Gebäude zuerst zu sanieren.

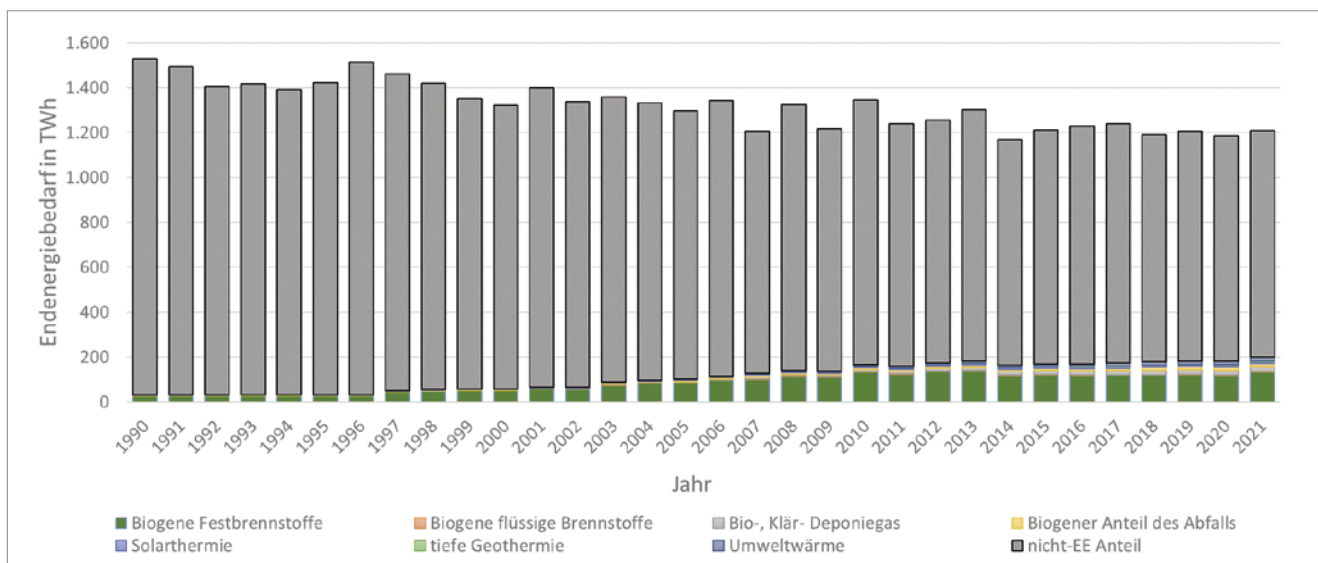
Zusätzlich kann eine Steigerung der Energieeffizienz auch durch den Einsatz von Smart Home-Produkten wie z. B. smarten Thermostaten erreicht werden. So konnten in zwei Pilotprojekten Energieeinsparungen von bis zu 30 % erreicht werden [4, 5].

Die Norm zur Gebäudeautomation DIN EN 15232 legt Einsparungen von bis zu 19 % fest und eine Studie mit einer Vielzahl an Praxisbeispielen [6] ermittelt Einsparpotenziale von 13 bis 30 %, was auch zeigt, dass der Nutzen vom konkreten Einsatzfall abhängt. So lassen sich durch smarte Thermostate in alten, energetisch schlechten Gebäuden, besonders bei wechselnder Belegung, die höchsten Einsparpotenziale durch intelligente Temperaturabsenkung erreichen.

Smart Home beinhaltet viele weitere Komponenten, z. B. neben Wärme und Kälte auch Lichtsteuerung, Zugangskontrolle, Unterhaltungselektronik, Außenanlagensteuerung sowie die intelligente Einbindung von PV-Anlagen ggf. mit Batterie und das intelligente (zukünftig bidirektionale) Laden von Elektroautos. Durch den Einsatz von thermischen und elektrischen Speichern ergeben sich hier, intelligent genutzt, hohe Flexibilitäten für das Energiesystem. Die zukünftigen Anforderungen an smarte Gebäude lassen sich wie folgt unterteilen:

- effizient und wohngesund
- Aufnahmefähigkeit von erneuerbaren Energien erhöhen
- das Gebäude zu einer reaktiven Komponente im Energiesystem weiterentwickeln
- die Gebäude selbst intelligent steuern

Im Folgenden werden Projekte aus dem FVEE-Verbund vorgestellt, die sich der Weiterentwicklung der Gebäude mit diesen Zielrichtungen widmen.



Entwicklung smarter Wohnungsstationen in Mehrfamilienhäusern

Dank der durch die verabschiedeten Energiegesetze verschärften Anforderungen an bautechnische Maßnahmen sowie der bereits am Markt etablierten und ausgereiften anlagentechnischen Lösungen (Flächenheizungs- und Wärmepumpensysteme) verringert sich das Heiztemperaturniveau auf ca. 40°C und ermöglicht so die Integration von erneuerbaren Energien in den Gebäudesektor. Das aus hygienischen Gründen erforderliche Temperaturniveau des Trinkwarmwassers von 55 bis 60°C (bei zentraler Trinkwarmwasserbereitung) lässt sich kaum reduzieren und erschwert die Wärmewende sowie die Integration

von erneuerbaren Energien, wie Umweltwärme und Solarenergie im Gebäudesektor.

Bei Mehrfamilienhäusern ließ sich das Temperaturniveau bisher bei zentralen Frischwasserstationen in Wärmezentralen nur geringfügig verringern, ohne die nach der anerkannten Trinkwasserhygieneregulierung angeforderte Zirkulationsproblematik und den damit verbundenen Mehrenergiebedarf zu vermeiden. Wohnungsstationen sind vielversprechende Lösungen in Mehrfamilienhäusern, die dezentral Trinkwarmwasser mit minimaler Legionellen-Gefahr und ohne Zirkulationsbedarf (bei Einhaltung der 3 Liter-Regel) bereitstellen können (► *Abbildung 3*).

Abbildung 1

Endenergiebedarf für Wärme und Kälte:
zeitliche Entwicklung aufgeschlüsselt nach Energieträgern

(Quelle: eigene Darstellung nach [1] ZAE Bayern)

Abbildung 2

Beheizungsstruktur:
• links: Neubau
• rechts: Bestand

(Quelle: eigene Darstellung nach Daten des BDEW [3] ZAE Bayern)

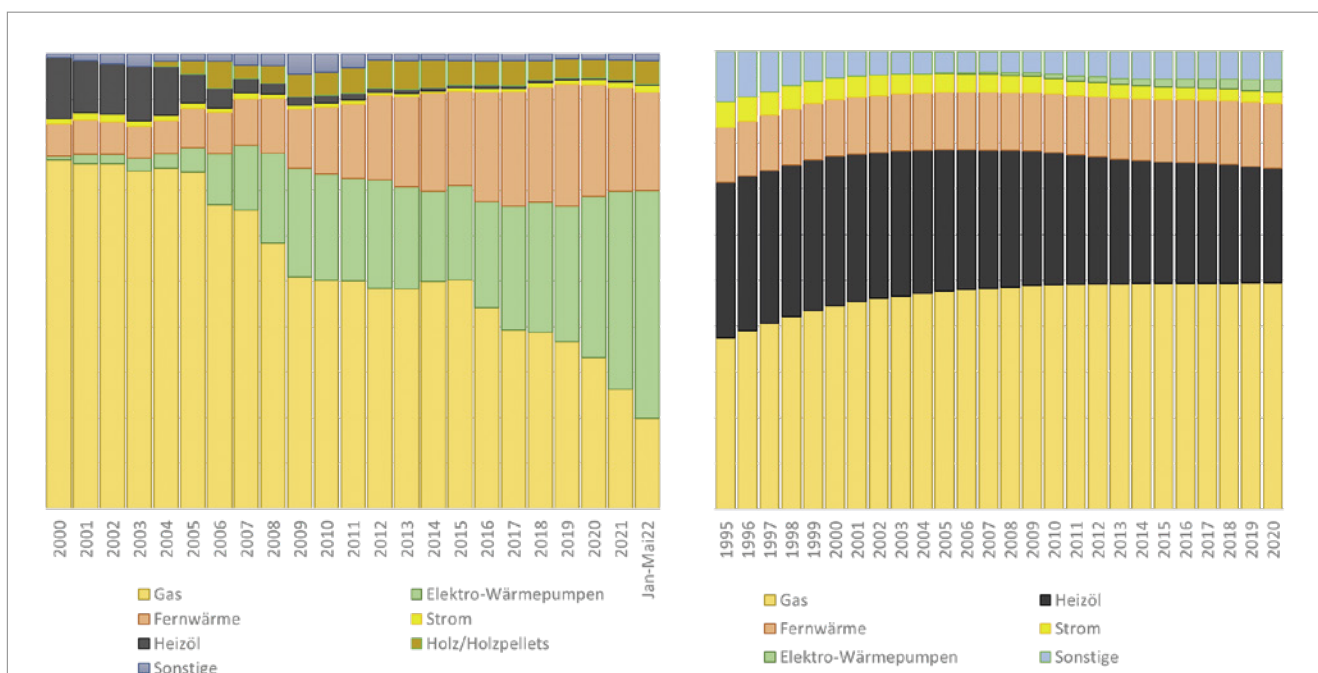
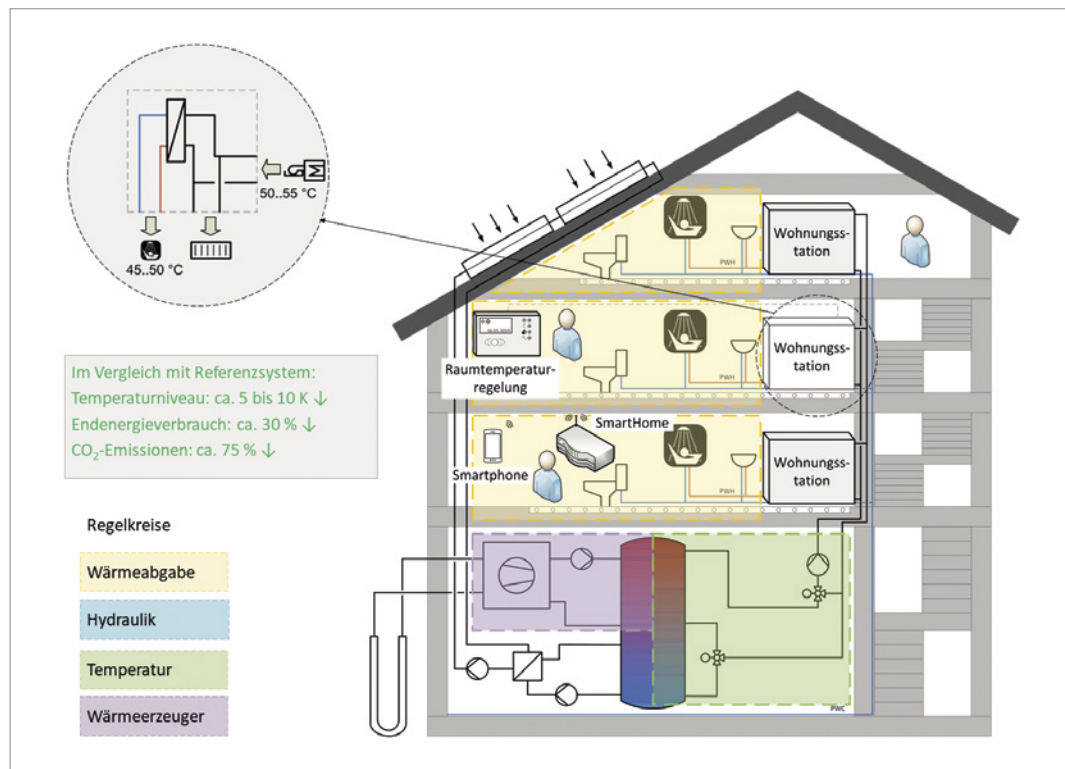


Abbildung 3
Dezentrale Durchfluss-Trinkwasser-Erwärmung mit smarten Wohnungsstationen. Raumtemperaturregelung, Einbindung in Regelkreise sowie SmartHome.
 (Quelle: ISFH)



Die im Rahmen des 7. Energieforschungsprogramms als Ziel gesetzte Digitalisierungswelle soll für eine smarte und effiziente Energieversorgung im Gebäudesektor sorgen. Das BMWK-geförderte Forschungsprojekt WoSta4.0 versucht die Wohnungsstationen durch digitale Vernetzung und intelligente Regelung zu optimieren. Die bisher statisch und informationsisoliert betriebenen Wohnungsstationen sollen durch digitale Vernetzung Informationen über Wärmebedarf (Nutzer) und -erzeugung (Wärmezentrale) sammeln und zur hocheffizienten Energieversorgung durch intelligente elektronische Regelung beitragen. Digitale Vernetzung lässt sich entweder durch Smartphone-Apps, Bediengeräte oder Smarthome-Stationen realisieren. Die bedarfsgeführte intelligente Regelung greift auf Wärmeabgabe, Hydraulik, Temperaturniveau und/oder Wärmeerzeuger zu. Die davon resultierende transparente dezentrale Energieversorgung in der Wohnung soll zum suffizienten Verhalten der Nutzer (Mieter) und zu einem vernünftigen Ressourceneinsatz in der Wärmeversorgung führen.

Die Wohnungsstationen drei unterschiedlicher Hersteller werden in drei Phasen bewertet und optimiert. Im Labor werden in der ersten Phase die smarten Wohnungsstationen geprüft und bewertet. Anhand eines validierten TRNSYS-Modells (Transient System Simulation) werden intelligente Regelungskonzepte und unterschiedliche Vernetzungsgrade in der zweiten Phase simuliert, entwickelt und analysiert.

In der dritten Phase werden die Hersteller die smarten Wohnungsstationen in drei Demonstrationsobjekten installieren und mit sieben Referenzobjekten vergleichen und bewerten.

Innovative Sandwich Fassadenelemente

Die zentrale Projektidee von LEXU_PLUS, ebenfalls ein vom BMWK unter 03EN1041A-D gefördertes Verbundprojekt, ist die Entwicklung von vorgefertigten Sandwich-Fassaden-Elementen für Sanierungen im Gebäudebestand, welche sowohl Umweltenergie gewinnen, Wärme/Kälte speichern, aktiv die Wärmeverluste der angrenzenden Räume über die sanierte Außenwand reduzieren und zusätzlich die Räume im Sinne größtmöglicher Behaglichkeit temperieren können. Somit erfüllen die zu entwickelnden Bauteile bzw. deren Kombination neben statischen Funktionen auch vollumfänglich die folgenden energetischen Funktionen:

- Energiegewinnung
- Energiespeicherung
- Temperierung
- Dämmung

Die geplante Entwicklung betrifft die Integration weiterer thermischer Funktionen in vorgefertigte Sandwich-Fassaden-Elemente unter Nutzung neuer (wärmebrückenreduzierter) Verbindungsmittel aus glasfaserverstärktem Kunststoff (GFK). Die Sandwich-

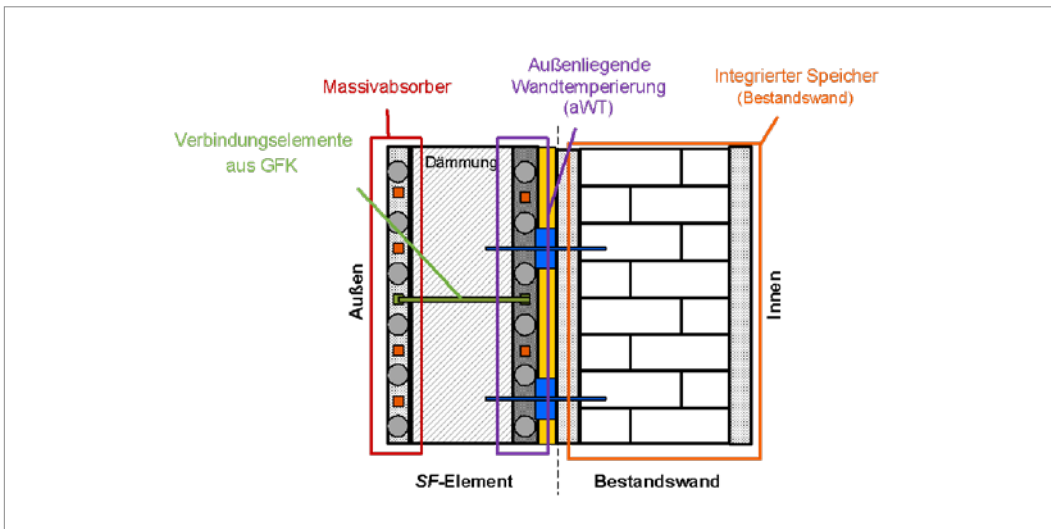


Abbildung 4

Sandwich-Fassaden-Element:

Aufbau mit Absorber und außenliegender Wandtemperierung, die über GFK-Verbindungselemente mit einer Dämmung aneinander befestigt sind.

(Quelle: IZES)

Fassaden-Elemente sollen auch in die überbetriebliche Ausbildung integriert werden. Außerdem beinhaltet das Projekt die Umsetzung an einer Demonstrationsfassade sowie einem Demonstrator (siehe ► *Abbildung 4*). Zusätzlich sind wesentliche Bestandteile von LEXU_PLUS die Untersuchung des praxisnahen Betriebsverhaltens der Bauteile im Testbetrieb sowie ein umfangreiches Monitoringprogramm zur Validierung der theoretischen Modelle und Konzepte. Dies dient als Voraussetzung für weitere Praxisanwendungen und zur Steigerung der Akzeptanz in der Baupraxis.

Die Kernthemen des Vorhabens sind somit die konsequente Weiterentwicklung sowie die Optimierung der Komponente „außenliegende Wandtemperierung“, einer Flächentemperierung für den Gebäudebestand, durch Erhöhung des Vorfertigungsgrades, erweitert um einen flexibel gestaltbaren Fassadenabsorber als integraler Bestandteil der Fassade, basierend auf den Ergebnissen des Vorprojekts „LEXU II“ [7] [8]. Die Erhöhung des Vorfertigungsgrades wird dabei durch die Herstellung von thermisch aktivierten Sandwich-Fassaden-Elementen in einem Fertigteilwerk erzielt.

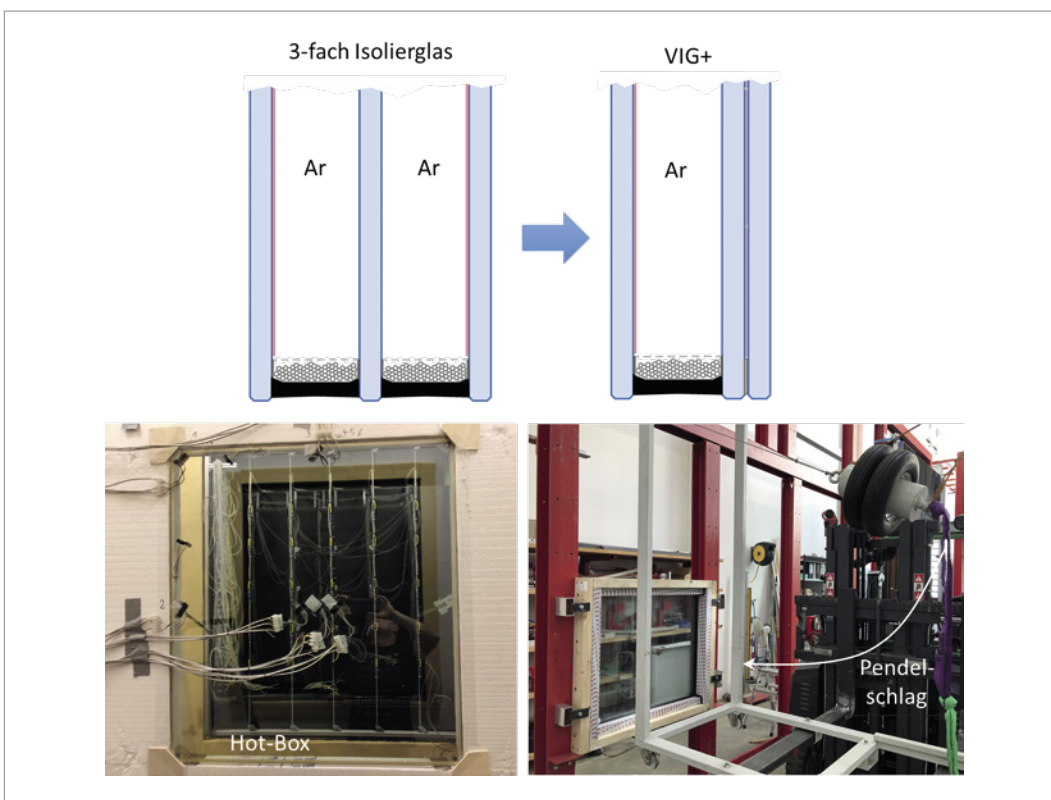


Abbildung 5

oben: Vergleich der Aufbaustärken von Fenstersystemen:

links: herkömmliches 3-fach Isolierglas
rechts: hybrides VIG+ mit Vorsatzscheibe

unten: Tests am Fenstersystem VIG+

links: Messung der thermomechanischen Eigenschaften mittels Dehnungsmessstreifen in offener Hotbox
rechts: Pendelschlagtest zur Prüfung der Absturzsicherheit

(Quelle: ZAE Bayern)

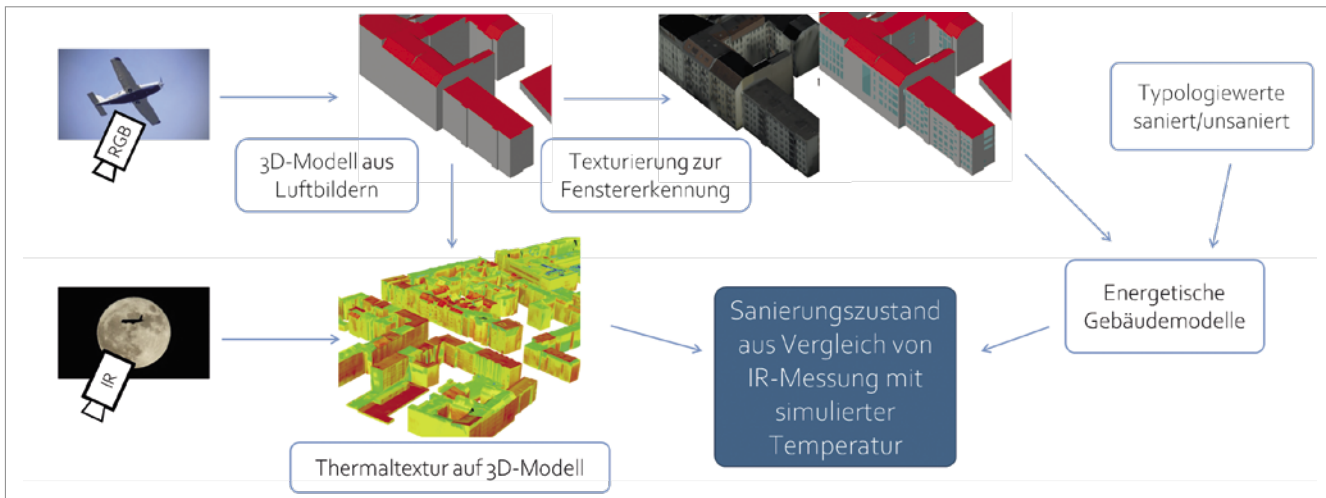


Abbildung 6
Großflächige energetische Bestandserfassung im Quartier
 Vorgehensweise mit Überflügen mit normaler und IR-Kamera. Die gewonnenen Daten werden durch Texturierung sowie Miteinbeziehung von Typologiewerten und GIS-Daten präzisiert.
 (Quelle: DLR)

Abbildung 6 Fenster- und Fassadenelemente mit hybridem Vakuumisolierrglas

Im BMWK-geförderten Verbundforschungsvorhaben FFS-VIG (FKZ 03EGB0021A) werden hochwärmedämmende und schlanke Fenster- und Fassadensysteme mit einer hybriden Verglasung bestehend aus Vakuum-Isolierrglas (VIG) mit Vorsatzscheibe (VIG+) zu aufeinander optimierten Systemen (FFS-VIG) entwickelt, getestet und im praktischen Einsatz erprobt (► *Abbildung 5*).

In Hinblick auf die Novellierung des Gebäudeenergiegesetzes in 2023 schafft FFS-VIG die Voraussetzung, dass im Neubau die Fensterflächen gleich groß bleiben oder sogar größer ausfallen können. Weiterhin ermöglicht die geringe und anpassbare Aufbaustärke von VIG+ den Einsatz in Bestandsgebäuden als Ersatz für eine Doppelverglasung, wodurch enorme Energieeinsparpotenziale erschlossen werden können. Die Vorsatzscheibe garantiert eine hohe Dauerhaftigkeit der Vakuum-Isolierrglas-Systeme, deren Nachweis im Projekt anhand von zyklischen Belastungsprüfungen erbracht wurde. Aufgrund der erheblichen Verbesserung des Dämmwertes halbiert sich der Wärmeverlust durch die Fensterfläche im Vergleich zu aktueller Dreifach-Isolierverglasung auf 0,3 W/(m²·K). Allerdings fehlten noch effiziente Systemlösungen im Bereich thermisch und bauphysikalisch optimierter Rahmen und Fassaden, um das Potenzial auch ausschöpfen zu können. Im Rahmen von FFS-VIG wurden praktikable und wirtschaftliche Systemlösungen für den Rahmen und VIG+ als Pfosten/Riegel-Fassade, Fensterflügel und Dachfenster entwickelt.

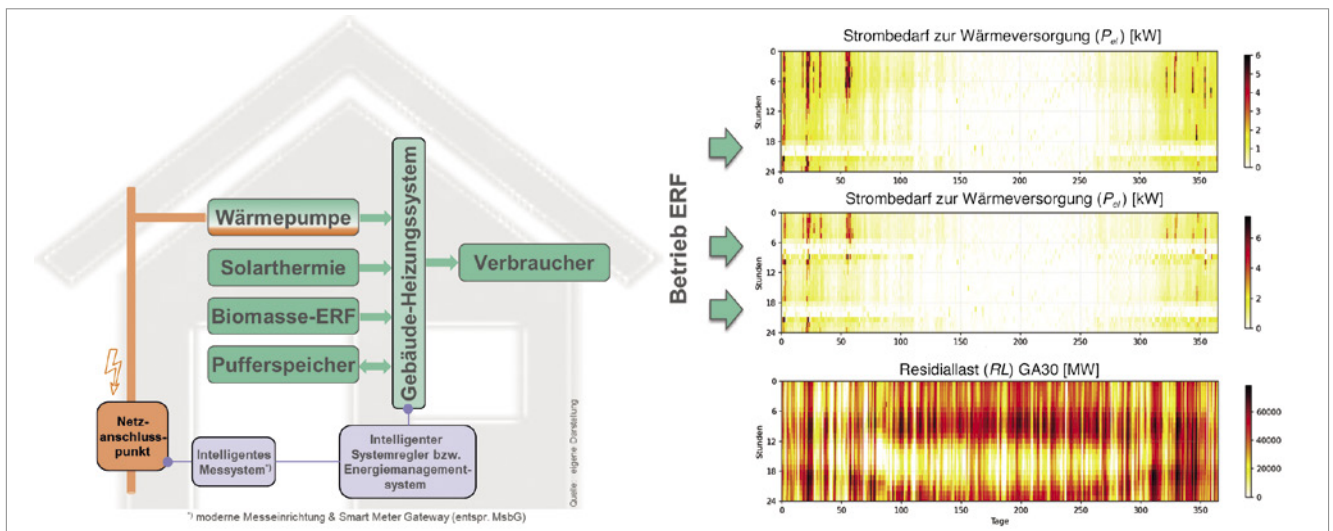
Nach erfolgreicher Erteilung der ZiE (Zustimmung im Einzelfall) soll der großflächige Einbau in das gesamte Obergeschoss des Demogebäudes erfolgen und einem Monitoring unterzogen werden.

Das maximale technische Einsparpotenzial durch den Einsatz von FFS-VIG+ im Gebäudebestand wurde anhand des Einsatzes in der deutschen Gebäudetypologie unter Annahme eines Gasbrennwertkessel zur Wärmebereitstellung ermittelt und beträgt auf die Endenergie bezogen 38 TWh/a bzw. auf Emissionen ca. 10Mio.tCO₂ äq.

Ermittlung des Sanierungsbedarfes aus Überflügen und Quartiersanalysen im Projekt „Gebäudetomograph“ (Gtom)

Eine schnelle Erfassung des Sanierungsbedarfs ist notwendig, um eine höhere Sanierungsquote zu realisieren und die effizientesten Maßnahmen als erstes anzugehen. Um großflächige Sanierungskonzepte umsetzen zu können, ist aber der Einsatz von Energieberatern (Gebäude für Gebäude) zu kleinteilig. Das DLR trägt mit dem Projekt „Gebäudetomograph“ (Gtom) dazu bei, dass mit aus Überflügen gewonnenen Daten der Sanierungsbedarf von Stadtteilen und Quartieren analysiert werden kann. Die einzelnen Schritte sind in ► *Abbildung 6* dargestellt.

Zunächst wird aus Luftbildern ein 3D-Modell der Gebäudekomplexe erstellt. Durch eine nachfolgende Texturierung werden Fenster erkannt und der entsprechende Flächenanteil bestimmt. Diese Daten fließen anschließend in energetische Gebäudemodelle ein, welche mit GIS-Daten (Geoinformationssysteme) und Statistiken (Zensus) zum Gebäudezustand ergänzt wird. Abschließend wird durch den Vergleich von Infrarot(IR)-Messungen aus Überflügen mit simulierten Temperaturen aus dem Gebäudemodell in Verbindung mit der bekannten Außentemperatur der konkrete Sanierungszustand der Gebäude ermittelt.



Das Gebäude als Teil des Energiesystems

Intelligenter Einsatz von Biomasseerzeugern als sektorübergreifende Flexibilitätsoption

Als sektorübergreifende Flexibilitätsoption hat das DBFZ im BMWK-geförderten Forschungsprojekt OptDienE (FKZ 03KB138) von August 2018 bis November 2021 das Potenzial untersucht, bei einem kombinierten Einsatz von biomassebasierten Einzelraumfeuerungen (ERF) und Wärmepumpen in Ein- und Zweifamilienhäusern (EZFH) in Deutschland die Last im Stromnetz durch dezentralen Leistungsausgleich verringern zu können.

Dazu wurden Hybridsysteme mit Einzelraumfeuerung (Typen: Kamineinsatz/Kaminkassette, Kaminofen, Offener Kamin) wie z. B.

- a) Einzelraumfeuerung + Wärmepumpe oder
- b) Einzelraumfeuerung + Solarthermie + Gastherme mit verschiedenen Anwendungsfällen und Rahmenbedingungen (z. B. Gebäudedämmung, Größe der Einzelraumfeuerung, Betriebsregime der Einzelraumfeuerung) untersucht (► *Abbildung 7*).

Es wurden rund 480 verschiedene Varianten simuliert. Im Ergebnis der Simulationen lassen sich in EZFH mit spezifischen Heizwärmebedarfen zwischen 25 und 287 kWh/(m²a) in Abhängigkeit der simulierten Konstellation maximale Reduzierungen des jährlichen Strombedarfs durch ERF bis zu 88% feststellen. Die festgestellten maximalen Reduzierungen des jährlichen Strombedarfs ausschließlich innerhalb der im Projekt selektierten Spitzenlastzeiten (6–9 und 18–21 Uhr) liegen zwischen 71 und 90% des jährlichen Strombedarfs für diese Zeitintervalle. Einen Anteil daran hat das Konzept, die ERF hydraulisch über eine Wassertasche in das Heizungssystem des Gebäudes zu integrieren, so dass überschüssig erzeugte Wärme gespeichert wird.

Potenzieller Beitrag für das erneuerbare Energiesystem:

- Aufgrund von Lagerfähigkeit des Brennstoffes und intelligentem Pufferspeichermanagement kann Residuallastschwankungen begegnet werden, die zukünftig noch weniger stark als heute festen zeitlichen Rhythmen folgen werden.
- Eine zielgerichtete Betriebsweise der ERF im Zusammenspiel mit Wärmepumpensystem und Solarthermie kann die Effizienz des Energieeinsatzes erhöhen durch:
 - Abgabe überschüssiger Wärme der ERF an das Gebäudeheizungssystem bzw. den Pufferspeicher
 - Einsatz von automatisierten Kommunikationslösungen bei der Bewertung von Zuständen des Stromnetzes am Netzanschlusspunkt

Die Hebung der vorhandenen Potenziale setzt jedoch Marktprodukte voraus, die das Angebot einer Lastverschiebungsoption auf Verbraucherseite monetär anerkennen.

Für die Jahre 2030 und 2050 wurde im Klimaschutzenszenario 95 (KS95) aufgrund von Gebäudeanzahl, Gebäudestruktur und ERF-Verteilung in Deutschland das größte Potenzial bei der Biomassefeuerung – bezogen auf die Anzahl der EZFH – im Cluster E90 (Heizwärmebedarf 60–120 kWh/(m²a) sichtbar [9,10].

Abbildung 7

(links) schematische Darstellung des untersuchten Wärmeversorgungssystems (rechts) Visualisierung des Systembeitrags der Heizungsanlage ohne Solarthermie

(Quelle: DBFZ)



Abbildung 8

Lokale Deckung des Wärmebedarfs mit PV-Anlage und Wärmepumpe:

Gebäudescharfe Berechnung für

(links) Großstadt Köln
(rechts) ländlich geprägtes Winterberg

(Quelle: FZ Jülich)

Lokale Photovoltaik und Demand-Side-Management als Alternative zu hoher Gebäudeeffizienz

Angesichts der derzeit häufig schlechten Verfügbarkeit von Handwerkern, hohen Kosten für Wärmedämmung-Verbundsysteme und anhaltend niedrigen Renovierungsraten erscheint es zweifelhaft, ob innerhalb der nächsten Jahre die Effizienzziele der Bundesregierung für Wohngebäude erreicht werden können. Eine Alternative kann die lokale Erzeugung mit einer Photovoltaik-Anlage sein. Das FZ Jülich untersucht, wie der lokal erzeugte Strom direkt von einer Wärmepumpe verwendet werden kann, um das Haus zu beheizen. Bei hinreichend großer Photovoltaik-Anlage kann auch im Winter noch genug Strom erzeugt werden, um den Bedarf aus dem Netz signifikant zu senken. Bei abgestimmter Anlagenkonfiguration und optimaler Fahrweise der Wärmepumpe kann eine PV-Anlage mit 10 kWp ca. 50% des Bedarfs eines mittleren Einfamilienhauses mit 20.000 kWh Wärmebedarf decken, wenn an die PV-Anlage nur die Wärmepumpe angeschlossen ist. Erste Studien ergaben, dass z. B. in Köln 47% der Gebäude mindestens 50% des Wärmebedarfs und in ländlichen Gebieten, z.B. der Gemeinde Winterberg (► *Abbildung 8*), über 74% der Gebäude über 50% des Wärmebedarfs mit lokaler Erzeugung decken könnten [11].

Wirtschaftlich kann dies insbesondere für Gebäude mittlerer Effizienz sein, in denkmalgeschützten Gebäuden, oder wenn eine Verfügbarkeit von Handwerkern für die Gebäudesanierung gering ist. Allerdings erreicht man solche Effizienzen nur bei optimierter Betriebsweise, signifikanten Speicherkapazitäten und der Nutzung des Gebäudes als thermischer Speicher. Die gegenwärtige Anlagentechnik bietet entsprechende Möglichkeiten nur

vereinzelt. Das IEK-3 des Forschungszentrums Jülich implementiert aktuell verschiedene typische Steuerungsalgorithmen in der Open-Source-Gebäude-Software HiSim, um entsprechende Standards zu erarbeiten [12]. Mitstreiter sind willkommen.

Intelligente Betriebsführung für ein erneuerbares Energiesystem

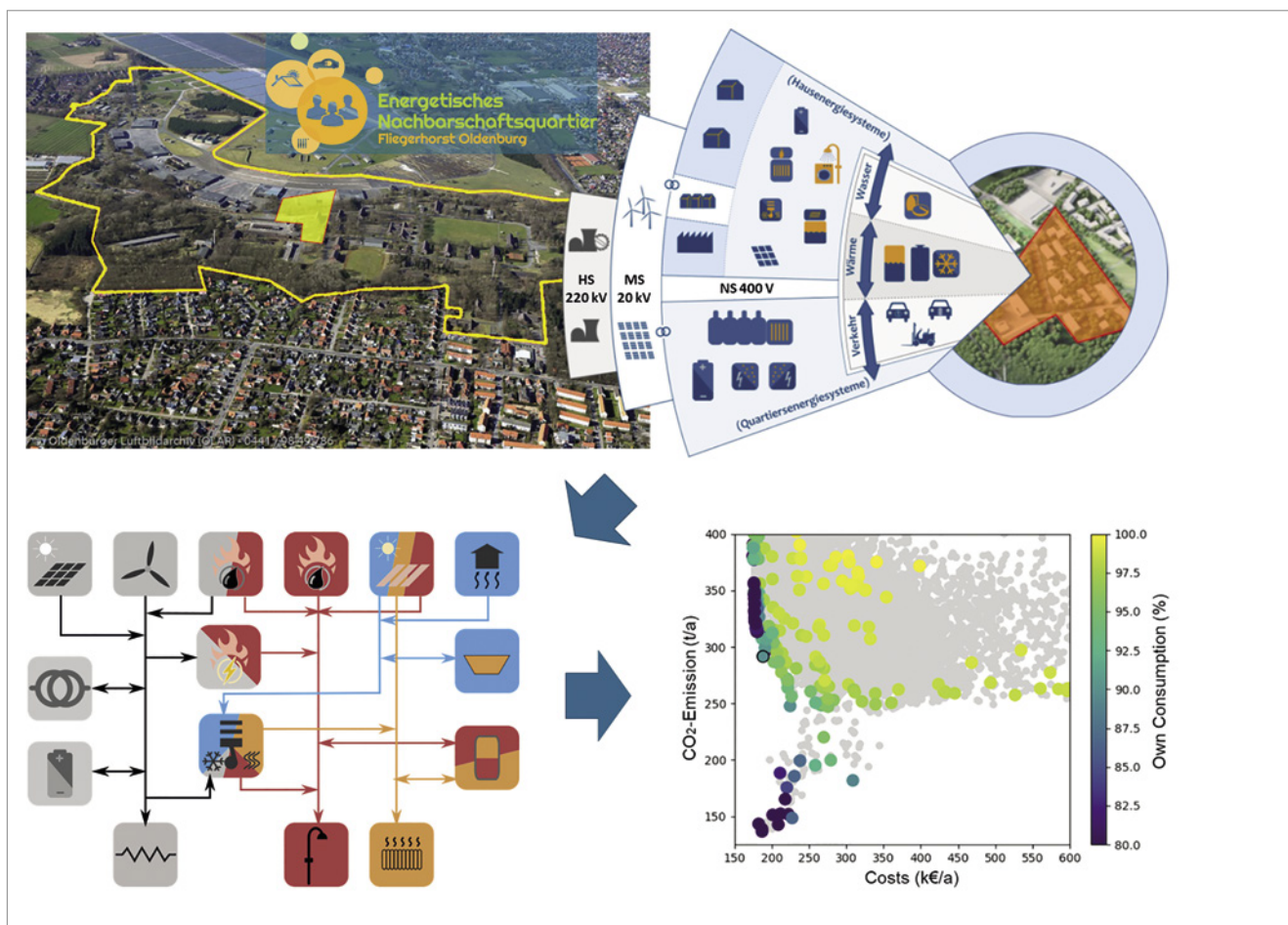
Im Rahmen des Forschungsprojektes „Energetisches Nachbarschaftsquartier“ (ENaQ), ebenfalls vom BMWK gefördert, wird vom DLR die intelligente Betriebsführung des Quartiers in einem erneuerbaren Energiesystems untersucht.

Das Design und die Betriebsführung von den Energiesystemen (Quartiere und Gebäude) werden mit dem Modellierungsframework MTRESS (Model Template for Renewable Energy Supply Systems) untersucht. Dieses erlaubt vielfältige Optimierungsoptionen unter Verwendung eines Technologieportfolios z. B. hinsichtlich Wirtschaftlichkeit, Emissionen und Eigenverbrauchsanteil (► *Abbildung 9*).

Darüber hinaus werden hochauflösende Planungs-werkzeuge für Quartiere erarbeitet. Dazu gehören GIS-basierte Potenzialabschätzungen und Tomographie-basierte Gebäudevermessung als Input für den Sanierungsbedarf.

Neben diesen systemischen Ansätzen werden auch innovative EE-Technologien als sektorenkoppelnde Elemente für TGA, Gebäudehülle, Gastechnik, Schnittstellen zur Mobilität im Labor unter realitätsnahen Bedingungen erprobt und validiert, um diese in Gesamtkonzepte zu integrieren (z. B. Hybride Heizsysteme mit Brennstoffzellen-Fahrzeugen).

Außerdem steht auch die Entwicklung selbstoptimierender Betriebsführungen inklusive hochaufgelöster Prognosemethoden und Verifizierung der Betriebs-



führung in Laborumgebung im Fokus. Zum Abschluss des Projektes wird die optimierte Betriebsführung der innovativen EE-Technologien in die Reallaborumgebung „Energetisches Nachbarschaftsquartier“ (ENaQ) in Oldenburg übertragen und verifiziert.

Zusammenfassung

Der klimaneutrale Gebäudebestand, der zum Erreichen der Pariser Klimaschutzziele schneller denn je erreicht werden muss, kann durch das synergetische Zusammenwirken von erhöhter Gebäudeeffizienz, den Einsatz erneuerbarer Energien (Schlüsseltechnologien Wärmenetze und Wärmepumpe), den intelligenten Betrieb der Gebäude und Quartiere selbst sowie die Bereitstellung von Netzdienlichkeit und Flexibilitäten im künftigen Energiesystem (Speicher), erreicht werden.

Allerdings sind auf dem Weg dorthin Hemmnisse zu überwinden. Beispielsweise stellt sich die Frage, wie man die Intelligenz effizient und bezahlbar in den Altbau bringen kann. Akut stellt der Fachkräftemangel (Energieberater, Handwerker ...) ein großes Umsetzungshemmnis dar, das die Erhöhung der

Sanierungsrate verlangsamt. Für die Gebäudeeigentümer wirken weiterhin die stark gestiegenen Investitionskosten in den letzten beiden Jahren abschreckend, wobei die in den letzten Jahren häufig wechselnden Rahmenbedingungen in der Förderung ebenfalls zu Unsicherheiten bei Investitionsentscheidungen führten. Auf der anderen Seite kann man die hohen Energiepreise auch als Ansporn ansehen, denn der der Handlungsdruck war noch nie so groß wie heute.

Abbildung 9
Schematische Darstellung zur Optimierung erneuerbarer Energiesysteme für Gebäude und Quartiere
(Quelle: DLR)

Literatur

- [1] BMWK, „Gesamtausgabe der Energiedaten – Datensammlung des BMWK,“ 20.01.2022. [Online]. Available: <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Artikel/Energie/energiedaten-gesamtausgabe.html>
- [2] Umweltbundesamt, „Treibhausgas-Emissionen in Deutschland,“ 15.03.2022. [Online]. Available: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/treibhausgas-emissionen-in-deutschland#entwicklung-der-treibhausgase-kohlendioxid-methan-distickstoffoxid>
- [3] BDEW, „Daten und Grafiken – Wohnen und Heizen,“ 08/2022. [Online]. Available: <https://www.bdew.de/service/daten-und-grafiken/?tags=wuh>.
- [4] HomeMatic, „Pilotprojekt belegt: smarte Homematic-IP-Thermostate sparen 31 % Energie,“ 07.10.2022. [Online]. Available: <https://www.imtest.de/287108/news/pilotprojekt-belegt-smarte-homematic-ip-thermostate-sparen-31-energie/>.
- [5] TH Köln, „Forschungsprojekt: Energieersparnis durch Smart HomeSysteme,“ 2018.
- [6] S. Beucker und S. Hinterholzer, „Energieeinsparung durch Gebäudeautomation – Ausgewählte Fallbeispiele,“ Borderstep Institut, Berlin, 2021.
- [7] C. Schmidt, G. Luther, H. Altgelt, S. Maars, B. Groß und F. Scholzen, „Außenliegende Wandtemperierung – LowEx-Anwendung zur Temperierung von Bestandsgebäuden und thermischen Aktivierung der Bestandswand: theoretische Grundlagen und Kennwerte,“ Bauphysik 39, Nr. 4, 2017.
- [8] C. Schmidt, H. Altgelt, B. Groß, G. Luther, S. Maars und F. Scholzen, „Außenliegende Wandtemperierung – Praktische Umsetzung anhand eines Demonstrationsgebäudes und Ermittlung der Systemkosten,“ Bauphysik 40, Nr. 4, 2018.
- [9] M. Koch, K. Hennenberg, K. Hünecke, M. Haller und T. Hesse, „Rolle der Bioenergie im Strom- und Wärmemarkt bis 2050 unter Einbeziehung des zukünftigen Gebäudebestandes,“ FKZ 03KB114, 2018.
- [10] D. Thrän, N. Szarka, H. Haufe, V. Lenz, S. Majer, K. Oemichen, M. Jordan, M. Millinger, R. Schaldach und J. Schüngel, „BioplanW: Systemlösungen Bioenergie im Wärmesektor im Kontext zukünftiger Entwicklungen: Schlussbericht,“ DBFZ-Report 36, Leipzig, 2020.
- [11] K. Dabrock, K. Knosala, N. Pflugradt, H. Beuth, L. Kotzur und D. Stolten, „The Potential of Combined PV and Air Source Heat Pump Systems in German Residential Buildings,“ in Eurosun, 2022.
- [12] „Github link zur Open-Source-Gebäudesoftware HiSim,“ [Online]. Available: <https://github.com/FZJ-IEK3-VSA/HiSim>.

Der ForschungsVerbund Erneuerbare Energien

Standorte der FVEE-Mitgliedseinrichtungen



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
 E-Mail: fvee@helmholtz-berlin.de • www.fvee.de

Mitgliedseinrichtungen und Ansprechpartner



CAE Center for Applied Energy Research e.V.
www.cae-zeroarbon.de
Magdalene-Schoch-Straße 3 • 97074 Würzburg
Martina Vornberger • 0931 70564-444
martina.vornberger@cae-zeroarbon.de



DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum gGmbH
www.dbfz.de
Torgauer Str. 116 • 04347 Leipzig
Paul Trainer: Tel. 0341/2434-437
paul.trainer@dbfz.de



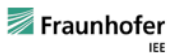
DLR Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. in der Helmholtz-Gemeinschaft
www.dlr.de
Zentrum Köln-Porz • 51170 Köln
thementeam-energie@dlr.de

Standort Stuttgart
Pfaffenwaldring 38–40 • 70569 Stuttgart
Denise Nüsse • 0711 6862-8086
denise.nuessle@dlr.de

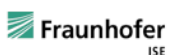
DLR-Projektteam auf der
PSA Plataforma Solar de Almería
Apartado 39 • E-04200 Tabernas (Almería)



Forschungszentrum Jülich
www.fz-juelich.de
52425 Jülich
Dr. Michael Czyperek: Tel. 02461/61-5450
info@fz-juelich.de



Fraunhofer IEE
Fraunhofer-Institut für Energiewirtschaft und Energiesystemtechnik
www.iee.fraunhofer.de
Joseph-Beuys-Straße 8 • 34117 Kassel
Uwe Krengel: Tel. 0561/7294-319
uwe.krengel@iee.fraunhofer.de



Fraunhofer ISE
Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE
www.ise.fraunhofer.de
Heidenhofstraße 2 • 79110 Freiburg
Christina Lotz: Tel. 0761/4588-5820
christina.lotz@ise.fraunhofer.de
Fraunhofer-Center für Silizium-Photovoltaik CSP
Walter-Hülse-Straße 1 • 06120 Halle
Technologiezentrum Halbleitermaterialien THM
Am St.-Niclas-Schacht 13 • 09599 Freiberg



Fraunhofer IWES
Fraunhofer-Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik
www.iwes.fraunhofer.de
Am Seedeich 45 • 27572 Bremerhaven
Inna Eck: Tel. 0471/14290-543
info@iwes.fraunhofer.de



GFZ Helmholtz-Zentrum Potsdam
Deutsches GeoForschungszentrum
www.gfz-potsdam.de
Telegrafenberg • 14473 Potsdam
Josef Zens: Tel. 0331/2880-1049
josef.zens@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. Stefan Bordihn / Dr. Bianca Lim: Tel. 05151/999-403
info@isfh.de



IZES gGmbH
Institut für ZukunftsEnergie- und Stoffstromsysteme
www.izes.de/
Altenkesseler Straße 17 • 66115 Saarbrücken
Michaela Schlichter: Tel. 0681/844 972-73
schlichter@izes.de



KIT Karlsruher Institut für Technologie
www.kit.edu
Kaiserstraße 12 • 76131 Karlsruhe
Monika Landgraf: Tel. 0721/608-48126
info@kit.edu



UFZ – Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung
www.ufz.de
Permoserstraße 15 • 04318 Leipzig
Doris Wolst: Tel. 0341/235-1269
info@ufz.de



Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH
www.wupperinst.org
Döppersberg 19 • 42103 Wuppertal
Christin Hasken: Tel. 0202/2492-187
info@wupperinst.org



ZAE Bayerisches Zentrum für Angewandte Energieforschung e.V.
www.zae-bayern.de
Jan Kunkel Tel. 089 / 329442-87
jan.kunkel@zae-bayern.de

Standort Garching
Walther-Meißner-Straße 6 • 85748 Garching



ZSW Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden Württemberg
Gemeinnützige Stiftung
www.zsw-bw.de
Meitnerstraße 1 • 70563 Stuttgart
Claudia Brusdeylins: Tel. 0711/7870-278
info@zsw-bw.de

Standort Ulm
Helmholtzstraße 8 • 89081 Ulm

Impressum

Themen 2022

Forschung für die Wärmewende – klimaneutral, effizient und flexibel

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

E-Mail: fvee@helmholtz-berlin.de • www.fvee.de

Redaktion

Petra Szczepanski

Franziska Wunschick

Förderung

Die vorliegende Publikation wurde durch das Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) gefördert (FKZ 2220NR312X).

Die Mitgliedseinrichtungen des ForschungsVerbunds Erneuerbare Energien werden durch diese Ministerien gefördert:

- BMWK
- BMBF
- BMUV
- BMEL
- BMVI

Layout, Grafik

Sunbeam GmbH

www.sunbeam-communications.com

Druck

Druckerei Flock, Köln

Berlin, Mai 2023

ISSN • 0939-7582