

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 unbekanntere 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

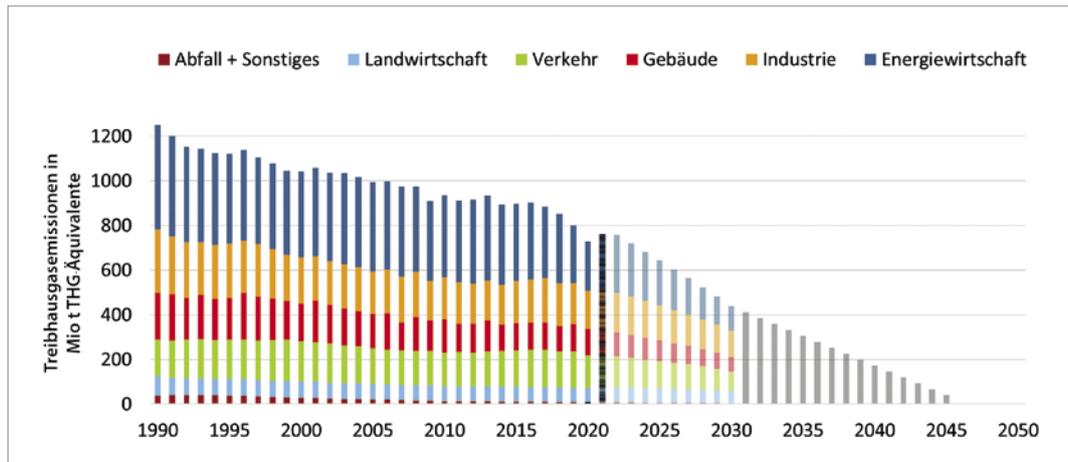
Wuppertal Institut

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.

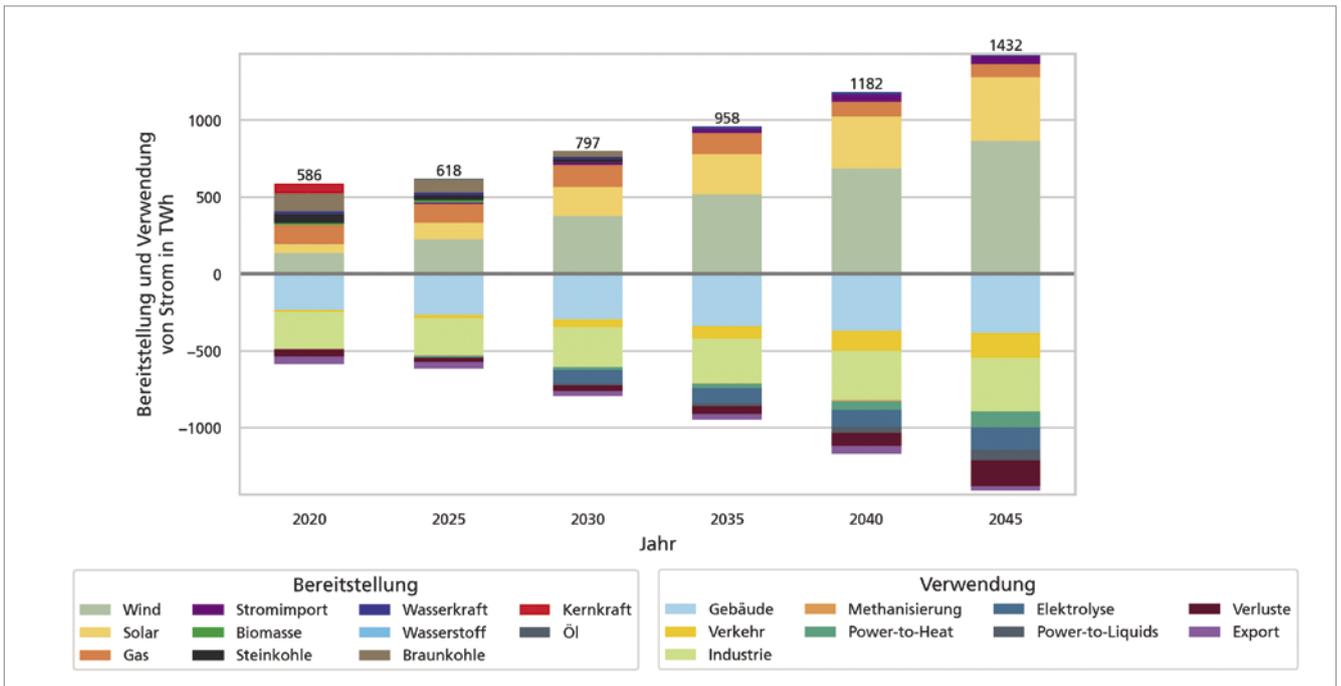
Eine Analyse des Effekts von thermischen Speichern auf die Abregelung erneuerbaren Stroms und auf den notwendigen Ausbau der eingesetzten Reservekraftwerke für unterschiedliche Szenarien zeigt ► **Abbildung 4**.

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)

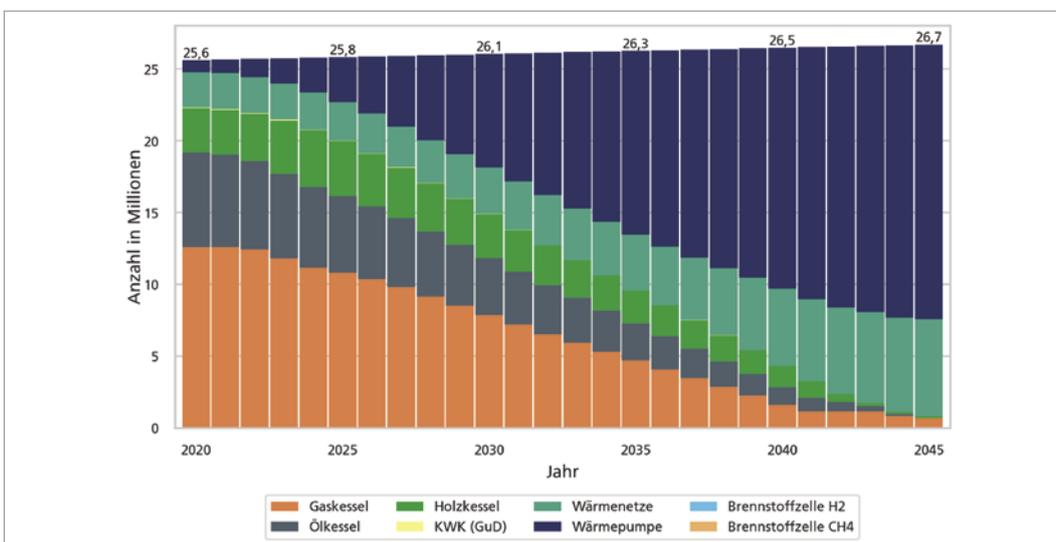


Abbildung 3
Szenario „Energiesouveränität“ des Gesamtsystems Deutschland
modelliert mit REMod. Dargestellt wird die mögliche Entwicklung des Anteils der Wärmeerzeuger in Gebäuden.
(Quelle: Fraunhofer ISE, basierend auf Ariadne Projekt, Deutschland auf dem Weg aus der Gaskrise – Wie sich Klimaschutz und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

Abbildung 4

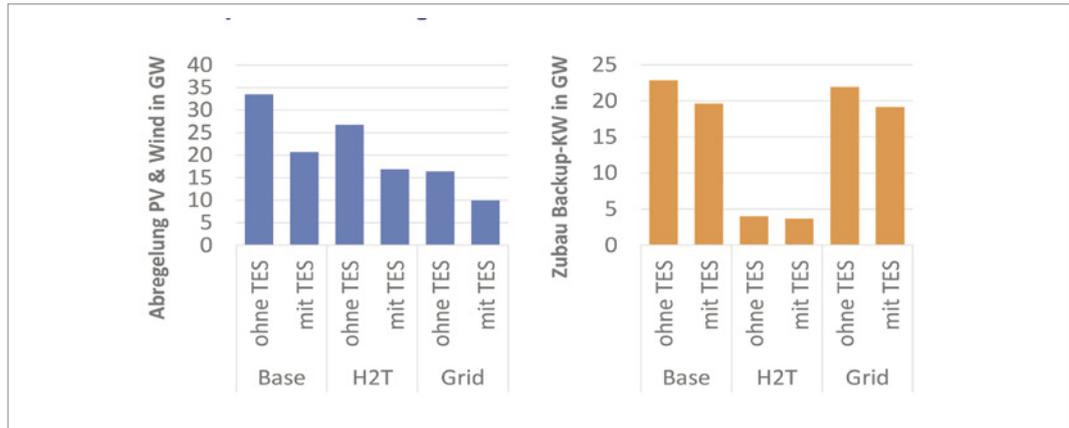
Effekt von thermischen Speichern (THS)

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)



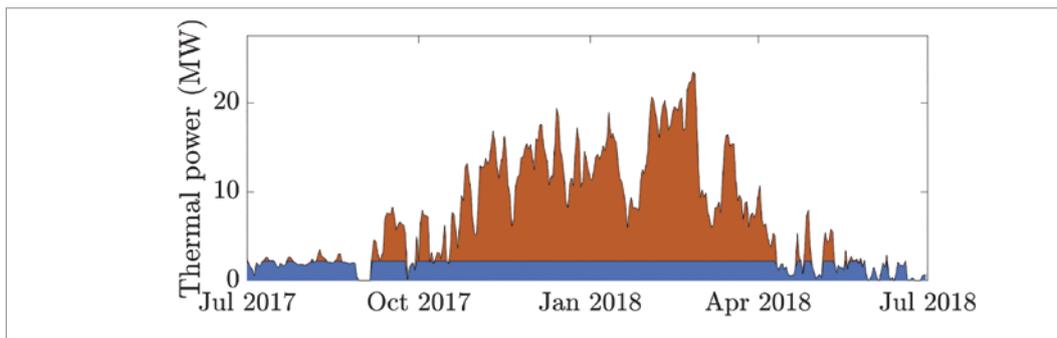


Abbildung 6

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)

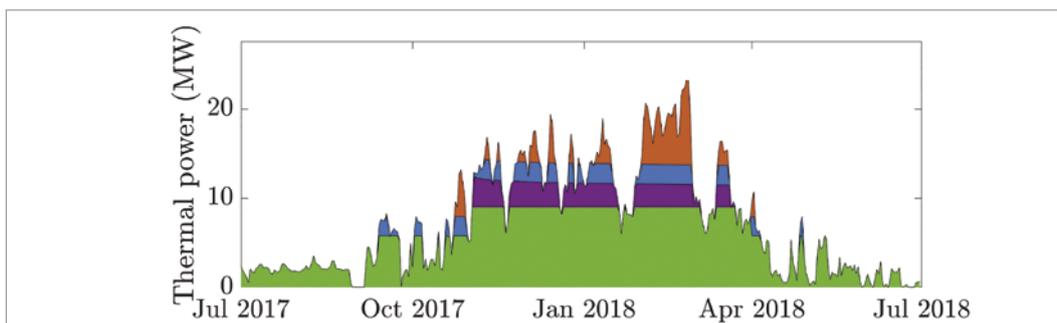


Abbildung 7

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