

# **Wärmeversorgung in Kassel ohne Kohle, Erdöl und Erdgas: Wie kann die Transformation gelingen?**

T. Vaupel, H. Braas, I. Best, J. Orozaliev, K. Vajen, U. Jordan

Universität Kassel, Institut für thermische Energietechnik  
Kurt-Wolter-Straße 3, DE-34109 Kassel

Tel.: +49 (0) 561 804 2636

E-Mail: [solar@uni-kassel.de](mailto:solar@uni-kassel.de)

Internet: [www.solar.uni-kassel.de](http://www.solar.uni-kassel.de)

## **Abstract**

Ziel der Untersuchungen ist die Erstellung von Szenarien für eine Wärmeversorgung der Stadt Kassel ohne Kohle-, Erdöl- und Erdgasverbrennung. Die derzeitige Wärmeversorgung der Stadt (mit 200.000 Einwohner:innen) basiert nahezu vollständig auf fossilen Energieträgern sowie der Verbrennung von Rest- und Abfallstoffen. Zur Berechnung des Wärmebedarfsrückgangs werden Sanierungsraten und weitere Parameter betrachtet. Der Wärmeverbrauch wird sowohl gebäudescharf als auch in einer Auflösung von „statistischen Blöcken“ evaluiert und in einem Wärmeetlas mit weiteren Daten, zum Beispiel zu Energieträgern, Wärmeerzeugern und Netzen, dargestellt. Um Wärmenetzgebiete auszuweisen, werden Fernwärme-Ausbaugebiete und Zentren für Nahwärmegebiete in Abhängigkeit der Wärmebelegungsdichte und anderen Kriterien identifiziert. Auf Grundlage einer Potenzialabschätzung für die Verbrennung von Abfallstoffen und Biomasse sowie die Nutzung von industrieller Abwärme wurde eine geeignete Größe für einen Erdbeckenspeicher abgeschätzt und Szenarien für den notwendigen Ausbau von Groß-Wärmepumpen und Solarthermieanlagen entwickelt. Um das ambitionierte Ziel einer Versorgung ohne fossile Energieträger zu erreichen, ist es notwendig, in allen Handlungsbereichen äußerst weitreichende Annahmen bzgl. Energieeinsparungen sowie Dimensionierung und Ausbauraten potenziell verfügbarer Wärmebereitstellungstechnologien zu treffen. So ergibt sich z.B. ein Szenario, das unter anderem eine Verdoppelung der derzeitigen Sanierungsrate bei gleichzeitiger Erhöhung der Sanierungstiefe vorsieht, sowie einen Fernwärmeanteil von 60 %, unter anderem mit Abfall- und Reststoffverbrennung (27 % des Gesamtwärmebedarfs), Groß-Wärmepumpen (ca. 24 %) und zentralen solarthermischen Anlagen (6 %, ca. 300.000 m<sup>2</sup> Kollektorfläche).

## **Einleitung**

Nach einem Beschluss der Stadtverordnetenversammlung der Stadt im Jahr 2019 wurde in Kassel ein Klimaschutzrat als Beratungsgremium gebildet, der mithilfe von Fachgruppen mögliche Konzepte und Maßnahmen entwickeln soll, um darzustellen, wie für Kassel bis 2030 Klimaneutralität erreicht werden kann. Die in diesem Artikel dargestellten Wärmeversorgungsszenarien sind in enger Zusammenarbeit mit der inzwischen eingerichteten Fachgruppe zur Energieversorgung des Klimaschutzrats entstanden.

Die verwendete Methodik basiert auf Verfahren zur kommunalen Wärmeplanung, wie sie zum Beispiel von der Klima- und Energieagentur Baden-Württemberg (KEA-BW, Leitfaden kommunale Wärmeplanung (Peters 2020)) beschrieben und in verschiedenen Forschungs- und Praxisvorhaben bereits zumindest in Teilen umgesetzt wird.

Wichtige Bausteine der kommunalen Wärmeplanung sind zum Beispiel eine Bestandsanalyse der Wärmeverbräuche, eine Potenzialanalyse zur Nutzung erneuerbarer Energien, die Entwicklung von Zielszenarien und Transformationspfaden vom Status Quo bis zum Zielszenario, eine Zuweisung von Nah- und Fernwärmegebieten und die Entwicklung konkreter Maßnahmen und Transformationspfade. Einen Überblick über aktuelle Forschungs- und Praxisvorhaben gibt eine Kurzstudie des Deutschen Instituts für Urbanistik (Riechel und Walter 2022). Die Kurzstudie enthält insbesondere eine Zusammenstellung von Forschungsfragen zur praktischen Umsetzung von Maßnahmen, wie zum Beispiel die Wirksamkeit eines Anschluss- und Benutzungsgebots von Wärmenetzen. Es zeigt sich, dass in der kommunalen Wärmeplanung hinsichtlich der Methodenentwicklung noch ein großer Forschungsbedarf besteht.

In einigen weiteren Studien werden auch Zielszenarien und Transformationspfade zu einer klimaneutralen Wärmeversorgung für Großstädte wie Hamburg und Berlin dargestellt (Egelkamp et al. 2021; Kicherer et al. 2021). Allerdings bezieht sich das Szenario für Hamburg lediglich auf die Fernwärmeversorgung und basiert zu hohen Anteilen auf der Nutzung von Biomasse (ca. 30 % in 2050). Im Szenario für Berlin wurden für Fernwärmeausbau und -verdichtung konstante Annahmen getroffen.

Im Folgenden werden zunächst Ergebnisse über den aktuellen Gesamt-Wärmeverbrauch der Stadt Kassel, die verwendeten Energieträger und ein Szenario zur Wärmebedarfsreduktion dargestellt. Zudem wird ein Szenario für den Fernwärmeausbau und die mögliche Ausweisung von Wärmenetzgebieten, sowie Abschätzungen zur Dimensionierung eines Saisonspeichers und der notwendigen Wärmeerzeugungskapazitäten präsentiert. Eine ökonomische Bewertung der Szenarien steht noch aus.

## **Wärmeversorgung in Kassel: Status Quo**

Dezentrale Gasheizungen decken etwa  $\frac{2}{3}$  des Gesamtwärmebedarfs in Kassel. Basierend auf Daten über existierende Öltanks wurde abgeschätzt, dass ca. 9 % des Wärmebedarfs mit dezentralen Ölheizungen erzeugt werden. Für die übrigen 4 % der Wärmeerzeuger ist der Energieträger unbekannt; möglicherweise handelt es sich ebenfalls um Ölheizungen oder weitere Technologien, wie zum Beispiel Pelletbrenner und Wärmepumpen (Hintz et al. 2020).

Ca. 21 % des Gesamtwärmebedarfs in Kassel wird durch ein Fernwärmenetz bereitgestellt. Die Wärmeerzeugung erfolgt durch Verbrennung von Kohle, Müll, Erdgas, aufbereitetem Altholz (Biomasse) und Klärschlamm in Heizkraftwerken, sowie von Heizöl zur Spitzenlastabdeckung. Die Wärmeversorgung basiert somit vollständig auf fossilen Energieträgern und Abfall (siehe Abbildung 1).

Ziel der Städtischen Werke Kassel ist es, bis 2025 die Kohleverbrennung durch Klärschlamm- und Altholzverbrennung zu substituieren. Aktuell werden hierzu entsprechende Umbaumaßnahmen an den Heizkraftwerken durchgeführt (Städtische Werke Kassel 2020).

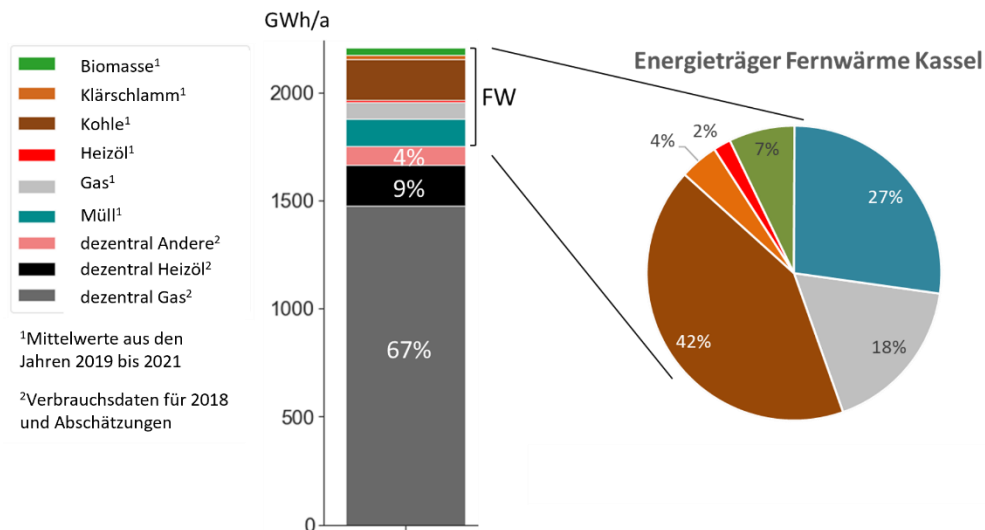


Abbildung 1: Heutige Energieträger in der Wärmeversorgung von Kassel

## Wärmebedarfsentwicklung in Kassel

Zur Evaluation von Wärmeverbräuchen wurde ein gebäudescharfer Wärmeatlas für die Stadt Kassel entwickelt. Die Wärmeverbräuche wurden für die Sektoren *Haushalte*, *Gewerbe/ Handel/ Dienstleistungen (GHD)* und *Industrie* getrennt ermittelt und auf Grundlage statistischer Daten jeweils den Anwendungen *Raumheizung*, *Warmwasser* und *Prozesswärme* zugeordnet.

Zur Beschreibung der zukünftigen Wärmebedarfsentwicklung wurden beispielsweise für die Anwendung Raumwärme im Sektor Haushalte folgende Treiber berücksichtigt: Wohnflächenentwicklung, Bestandsabrissquote, Sanierungsrate, Sanierungseffizienz, Neubaurate, Neubau-Effizienzstandards und die Entwicklung der Gradtagzahlen. Wichtige Treiber für die Sektoren GHD und Industrie z.B. sind die Anzahl der Erwerbstätigen und Effizienzmaßnahmen (Raumwärme) sowie die Entwicklung der Wertschöpfung und Energieintensität (Prozesswärme) (Hinz et al. 2020).

Bei der Parametrisierung wurden, soweit möglich, Daten aus Szenarien für Kassel verwendet. Zudem wurden landes- und bundesweite Trends und Szenarien berücksichtigt.

Einen entscheidenden Einfluss auf die Wärmeverbrauchsentwicklung haben jedoch die Sanierungsrate (Anteil der sanierten Wohnfläche) und Sanierungstiefe (Wärmebedarfsreduktion pro Wohnfläche) von Haushalten, da der Raumwärmebedarf in diesem Sektor den größten Anteil am Gesamtwärmebedarf hat. Die derzeitige Sanierungsrate in Deutschland liegt bei ca. 1 %/a (Bundesverband deutscher Wohnungs- und Immobilienunternehmen, (Kuhlmann 2019)). Abbildung 2 zeigt vier

Szenarien für den Wärmeverbrauch in Kassel bis 2050 mit Sanierungsraten zwischen 1 und 3 %/a und Sanierungstiefen von 30 % und 50 %. Die resultierenden Gesamtwärmeverbräuche im Jahr 2030 liegen zwischen ca. 87 % und 80 % des Wärmebedarfs im Jahr 2018.

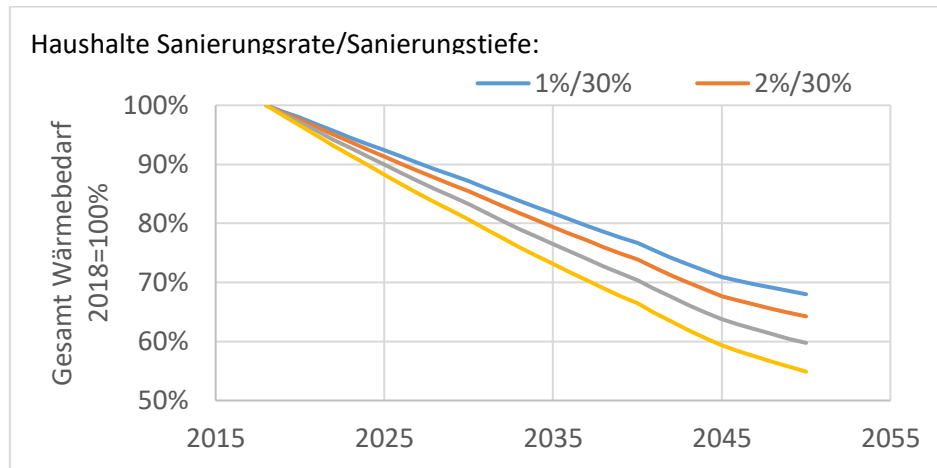


Abbildung 2: Wärmebedarfsreduktion bei Variation der Sanierungsraten und -tiefen

In den weiteren Untersuchungen wird eine Sanierungsrate von 2 %/a und eine Sanierungstiefe von 50 % angesetzt. Mit diesen Annahmen und unter Berücksichtigung der übrigen Treiber ergibt sich bis zum Jahr 2030 eine Wärmebedarfsreduktion von ca. 17 % im Vergleich zu 2018.

Eine Erhöhung der Sanierungsraten und -tiefen kann unter anderem durch Sanierungsprogramme, Energiekarawanen oder stadtteilspezifische Förderprogramme erfolgen.

## Priorisierung der Gebiete für Wärmenetze und dezentrale Wärmeversorgung

Bisher wird ca. 21 % des Kasseler Wärmebedarfs mit Fernwärme bereitgestellt. Verschiedene Studien zur zukünftigen dekarbonisierten Wärmeversorgung gehen jedoch von einem weit höherem Fernwärmeanteil in Großstädten von 50 bis 80 % aus (Thamling und Langreder 2020; Gerhardt et al. 2019; Maaß et al. 2021).

Abbildung 3 zeigt beispielhaft ein Szenario für eine Zuweisung von 70 % des Kasseler Wärmebedarfs bei 100 % Anschlussquote der Gebäude an Wärmenetze. Die Auswertung erfolgt auf Basis von statistischen Blöcken als kleinste administrative Einheit einer Stadt, die in der Regel Häuserblöcke umfasst, die durch Straßen, Flüsse oder Ähnliches getrennt sind (Dieckmann und Trutzel 1991).

Wärmeverbräuche der Einzelgebäude und Trassenlängen werden in den statistischen Blöcken summiert und Wärmebelegungsdichten, definiert als das Verhältnis von Wärmeabnahme zu Trassenlänge, evaluiert.

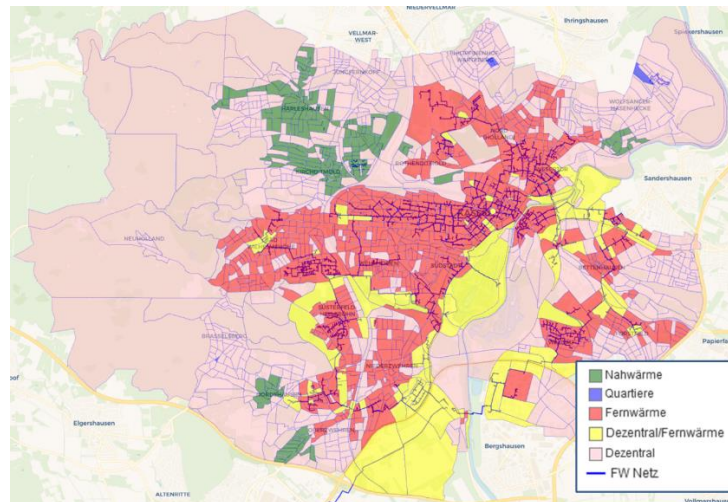


Abbildung 3: 70 %-Potenzialgebiete für den Fernwärmeausbau in Kassel

Das bestehende Wärmenetz wird in Abhängigkeit der lokalen Wärmebelegungsichten sukzessive erweitert. Mit einem numerischen Algorithmus werden angrenzende Gebiete nach definierten Kriterien ausgewählt.

Das Verfahren zur Erweiterung des Fernwärmenetzes beginnt mit der Ermittlung des Verdichtungspotenzials, in dem alle statistischen Blöcke untersucht werden, in denen sich bereits eine Fernwärmeleitung befindet und in denen eine Mindest-Wärmebelegungsichte vorliegt. Allein mit einer solchen Verdichtung des Netzes kann nahezu eine Verdoppelung des Fernwärmeanteils von 21 % auf ca. 40 % des Wärmebedarfs in Kassel erreicht werden.

Bei einem weiteren Ausbau des Fernwärmenetzes werden alle benachbarten Gebiete des aktuellen Fernwärmegebietes betrachtet und in Abhängigkeit von der Wärmebelegungsichte unter Berücksichtigung der Wärmebedarfsreduktion bis 2050 als Prioritätsgebiete ausgewiesen. Dieser Schritt wird sukzessive weitergeführt, bis eine Grenzwärmebelegungsichte oder ein vorgegebener Anteil an netzgebundener Wärmeversorgung erreicht wird.

Um zusätzlich geografisch weit vom aktuellen und erweiterten Fernwärmegebiet entfernt liegende Gebiete zu berücksichtigen, werden mit weiteren Algorithmen mögliche Zentren für Nahwärmegebiete identifiziert, in denen mehrere statistische Blöcke mit einem eigenem Erzeugerpark und Wärmenetz versorgt werden. Von diesen Zentren ausgehend werden wie beim Fernwärmegebiet weitere statistische Blöcke als Wärmenetzgebiete identifiziert.

In einem nächsten Schritt werden unterschiedliche Anschlussraten vorgesehen. Diese hängen von Wärmebelegungsichten in den Gebieten sowie weiteren Parametern, wie zum Beispiel technischen Hemmnissen und der Ausweisung von Prioritätsgebieten mit Anschluss- und Benutzungsgebot von Wärmenetzen ab.

Mit einer Anschlussrate von 95 % in Gebieten mit sehr hohen Wärmebelegungsichten und weiteren Abstufungen der Anschlussraten auf 80 % bis 60 % reduziert sich der

Anteil von Fern- und Nahwärmenetzen in Abbildung 3 von 70 % auf ca. 60 % des Gesamtwärmebedarfs.

In Abhängigkeit der Grenzwerte für die Wärmebelegungsichte bzw. für den geforderten netzgebundenen Anteil des Ausbaus von Nah- und Fernwärmenetzen wurden Karten für verschiedene Ausbaupfade erstellt. Gebiete, die nicht für eine netzgebundene Wärmeversorgung vorgesehen werden, sollen dezentral mit Wärmepumpe, Biomasse und Solarthermie versorgt werden.

## **Wärmeerzeugungs-Szenarien**

### ***Lastprofil***

Die saisonale Verteilung des Wärmeverbrauchs wird durch ein synthetisches Standardlastprofil (kurz: SLP) in Stundenaufösung modelliert (BDEW, 2016) und basiert auf einem durchschnittlichen Außentemperaturprofil (Meteonorm) für den Standort Kassel. Das Lastprofil enthält Anteile für die zentrale und dezentrale Versorgung. Bei der zentralen Versorgung werden vereinfachend über das Jahr konstante Wärmeverteilverluste in Höhe von 15 % des Wärmeabsatzes berücksichtigt.

### ***Berechnungstools***

Die Wärmeeinspeisung in das Wärmenetz und die Be- und Entladung des Saisonalspeichers werden auf stündlicher Basis mit vereinfachten Python-basierten Bilanzmodellen berechnet. Das Profil für solarthermische Wärmebereitstellung wird durch Wetterdaten (Solarstrahlung und Außentemperatur) und die Berechnung von Kollektorfeldwirkungsgraden (für Flachkollektoren) bestimmt und anschließend über die installierte Fläche skaliert.

Der Saisonalspeicher ist vereinfacht als Wärmekapazität abgebildet. Die Wärmeverluste des Speichers werden in Abhängigkeit des zeitabhängigen Ladezustandes berechnet und so skaliert, dass sich bezogen auf die ausgespeiste Wärmemenge ca. 10 % Wärmeverluste ergeben.

Für die Heizkraftwerke werden konstante thermische und elektrische Wirkungsgrade angenommen. Die Wärmeeinspeisung in Speicher und Wärmenetz folgt festen Prioritäten. Diese sind weiter unten für die einzelnen Szenarien beschrieben.

### ***Zukünftige Energieträger und Wärmepumpen***

Bei einer Wärmeversorgung ohne Kohle, Erdöl und Erdgas werden folgende Technologien und Energieträger berücksichtigt:

- Einspeisung in Wärmenetze: Abfallverbrennung, Biomasse (Altholz), industrielle Abwärme, Groß-Wärmepumpen, große Solarthermieranlagen und Biogas-Spitzenlastkessel
- Gebäudeindividuelle Wärmeversorgung: Wärmepumpen, Solarthermie und Biomasseheizkessel

In der Fernwärmeversorgung dient die Müll- und Klärschlammverbrennung sowie die Nutzung industrieller Abwärme als Grundlast und wird vereinfachend als konstant angenommen. Biomasse (Altholz) und Biogas dienen zur Abdeckung von Spitzenlasten. Das vom kommunalen Energieversorger veranschlagte Potenzial der Klärschlamm-, Altholz- und Müllverbrennung und das abgeschätzte Abwärmepotenzial beläuft sich insgesamt auf ca. 600 GWh/a. Dies entspricht einem Anteil am Gesamtwärmeverbrauch in Kassel von ca. 27 %. Durch die Abfall- und Reststoffverbrennung entstehen schon heute hohe sommerliche Wärmeüberschüsse, die bisher mit Flusswasser (Fulda) abgeführt werden. Um diese Überschusswärme im Winter nutzbar zu machen, ist ein saisonaler Speicher nötig.

Für Groß-Wärmepumpen, die in Wärmenetze einspeisen, wird eine mittlere System-Jahresarbeitszahl (SJAZ) von 3,1 angesetzt. Mögliche Wärmequellen für Großwärmepumpen sind Niedertemperatur-Abwärme aus der Industrie, sowie Fluss-, Kläranlagen- und sonstiges Abwasser, sowie oberflächennahe und tiefe Geothermie.

Auf Grund der begrenzten Verfügbarkeit von Biomasse wird angenommen, dass nur ca. 5 % des Kasseler Gesamtwärmebedarfs in der dezentralen Versorgung mit Biomasse gedeckt wird. Zudem wird angenommen, dass der sommerliche Wärmebedarf bei allen Biomasse-Heisanlagen mit einer Solarthermieanlage gedeckt wird.

Da in Großstädten überwiegend Luft-Wärmepumpen zum Einsatz kommen und der weit überwiegende Anteil der Gebäude bis 2030 nicht saniert sein wird, wird eine mittlere System-Jahresarbeitszahl (SJAZ) der Gebäude-Wärmepumpen von 2,7 angenommen, in Anlehnung an die Ergebnisse von Bergmann und Erhorn 2017; Langner et al. 2014; Günther et al. 2020. Zudem wird angenommen, dass jede vierte Wärmepumpen-Heisanlage mit einer Solarthermieanlage kombiniert wird.

### ***Saisonalspeicher***

Es wird ein Erdbeckenspeicher als Saisonalspeicher berücksichtigt und angenommen, dass das Speicherwasser mit einer Wärmepumpe bei Bedarf im unteren Speicherbereich auf 20°C abgekühlt und im oberen Speicherbereich auf 85°C erwärmt wird.

Derartige Speicher mit Volumina zwischen ca. 60.000 m<sup>3</sup> und 200.000 m<sup>3</sup> wurden zum Beispiel bereits in den dänischen Städten Dronninglund, Marstal, Gram und Vojens errichtet. Ein weiterer Speicher mit einem Volumen von 700.000 m<sup>3</sup> ist zurzeit in Odense, Fünen (DK), in Planung.

Eine Gesamtbetrachtung, Machbarkeitsstudien und technische Untersuchungen zur Hochskalierung derartiger Erdbeckenspeicher finden sich zum Beispiel in den Veröffentlichungen von Tziggili et al. 2013, Weinhold und Rühling 2019 bzw. van Helden 2022. Es werden zurzeit neue Liner-Materialien entwickelt, die zukünftig eine Speichertemperatur von 95°C ermöglichen sollen (van Helden 2022).

## Szenario 27 % Fernwärmeanteil

- **Dezentrale Versorgung mit regenerativen Energien &**
- **zentrale Abfall- und Reststoffverbrennung + Abwärmenutzung**

Zunächst wird angenommen, dass lediglich das veranschlagte Potenzial für die Abfall- und Reststoffverbrennung und das Abwärme-Potenzial, das insgesamt 27 % des Gesamtwärmebedarfs entspricht, für die Fernwärmeversorgung genutzt wird. Somit muss der gesamte übrige Wärmebedarf dezentral durch Wärmepumpen sowie dezentrale Solarthermie- und Biomasseverbrennungsanlagen gedeckt werden.

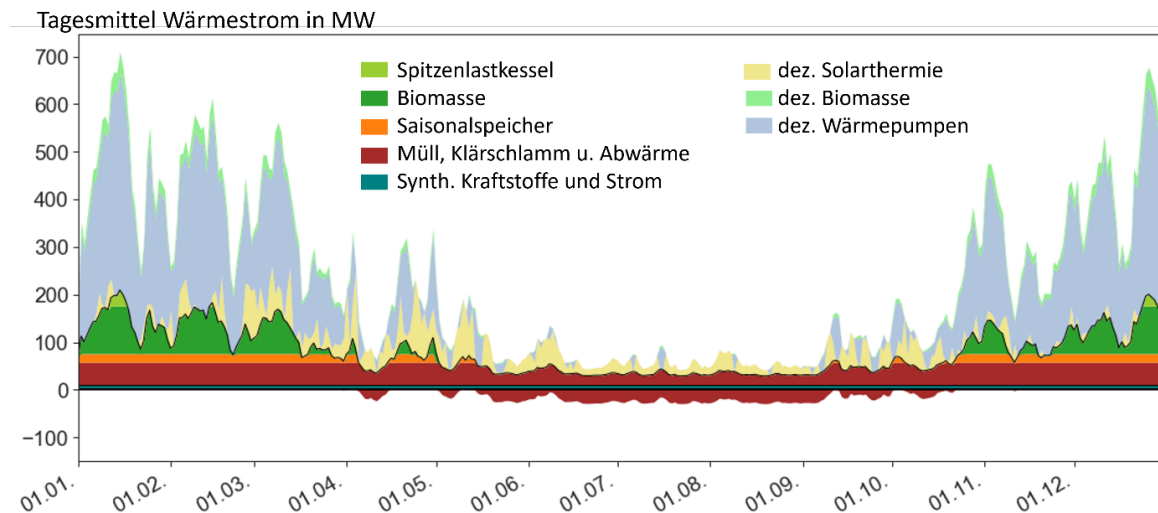


Abbildung 4: Synthetisches Lastprofil für das 27 %-Fernwärmeausbauszenario mit einem saisonalen Speicher

Abbildung 4 zeigt die saisonale Verteilung der Wärmeversorgung. Die kräftigen Farben zeigen die Wärmeversorgung durch Fernwärme, die blassen Farben die dezentrale Wärmeversorgung. Unterhalb der x-Achse ist der in den Saisonalspeicher geleitete Wärmestrom dargestellt.

Für den Saisonalspeicher ergibt sich in diesem Szenario ein notwendiges Speichervolumen von ca. 960.000 m<sup>3</sup>.

## Szenarien mit einem Fernwärmeanteil von 40 bis 70 % (bei konstantem Speichervolumen)

In den folgenden Szenarien wird weiterhin ein Speichervolumen von 960.000 m<sup>3</sup> betrachtet, das sich gemäß Abbildung 4 aus dem Speicherbedarf der Abfall- und Reststoffverbrennung sowie der industriellen Abwärme (Grundlast) ergibt. Bei einem weiteren Ausbau des Fernwärmenetzes und dem daraus resultierenden höheren sommerlichen Verbrauch sinkt der sommerliche Speicherbedarf durch die Grundlast. Im Gegenzug können solarthermische Großanlagen und Groß-Wärmepumpen in das System integriert werden, um die sommerlichen Speicherkapazitäten zu nutzen.



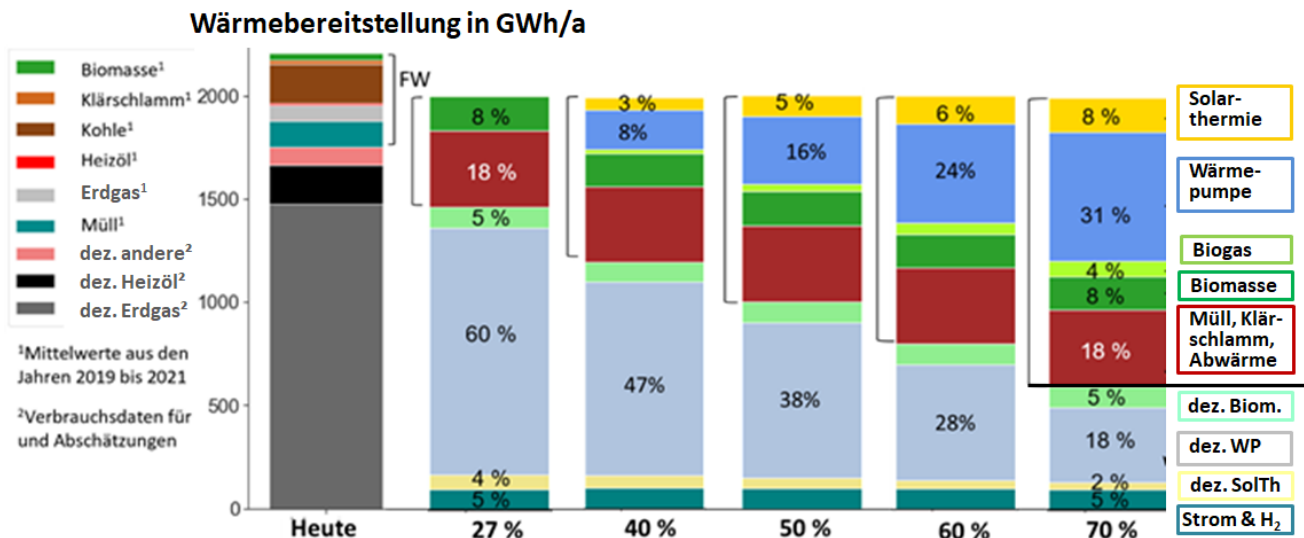


Abbildung 5: Szenarien in Abhängigkeit des Nah- und Fernwärmeausbaus bei festem Wärmebedarfsrückgang.  
Speichervolumen: 960.000 m<sup>3</sup>

Abbildung 5 links zeigt den Energiemix der heutigen Wärmeversorgung in Kassel aus Abbildung 1. Daneben sind Zielszenarien mit höheren Fernwärmeanteilen zwischen 27 und 70 % abgebildet.

Bei einem Ausbau des Fernwärmeanteils von 21 % auf 27 % kann, wie oben beschrieben, der Saisonspeicher die sommerlichen Überschüsse aus der Abfall- und Reststoffverbrennung und industriellen Abwärme in das Winterhalbjahr verschieben. Bei einem weiteren Ausbau der Fernwärmeinfrastruktur werden bei den in Abbildung 5 dargestellten Szenarien zunehmend Großwärmepumpen und solarthermische Großanlagen anstatt kleiner, dezentraler Wärmepumpen und Solarthermieanlagen eingesetzt.

Im dargestellten Szenario mit einem Fernwärmeanteil von 60 % wird zum Beispiel 24 % des Wärmebedarfs durch Groß-Wärmepumpen bereitgestellt und 28 % durch dezentrale Wärmepumpen. Der Anteil Solarthermie aus zentralen Kollektorfeldern beträgt 6 % des Gesamtwärmebedarfs. Dies entspricht einer Kollektorfläche von ca. 300.000 m<sup>2</sup>.

In Abbildung 6 ist die saisonale Verteilung der Wärmeversorgung für das Szenario mit 60 % Fernwärmeanteil dargestellt. Der Saisonspeicher wird zusätzlich mit Solarwärme beladen. Die Entladung des Speichers erfolgt in mehreren kürzeren Intervallen auch in den Sommermonaten und leistet ab der zweiten Septemberwoche bis Mitte März fast kontinuierlich einen gewissen Beitrag zur Wärmeversorgung. Die Einspeisung von Wärme aus Groß-Wärmepumpen ist ebenfalls denkbar, wird in den dargestellten Szenarien allerdings nicht berücksichtigt.

Tagesmittel Wärmestrom in MW

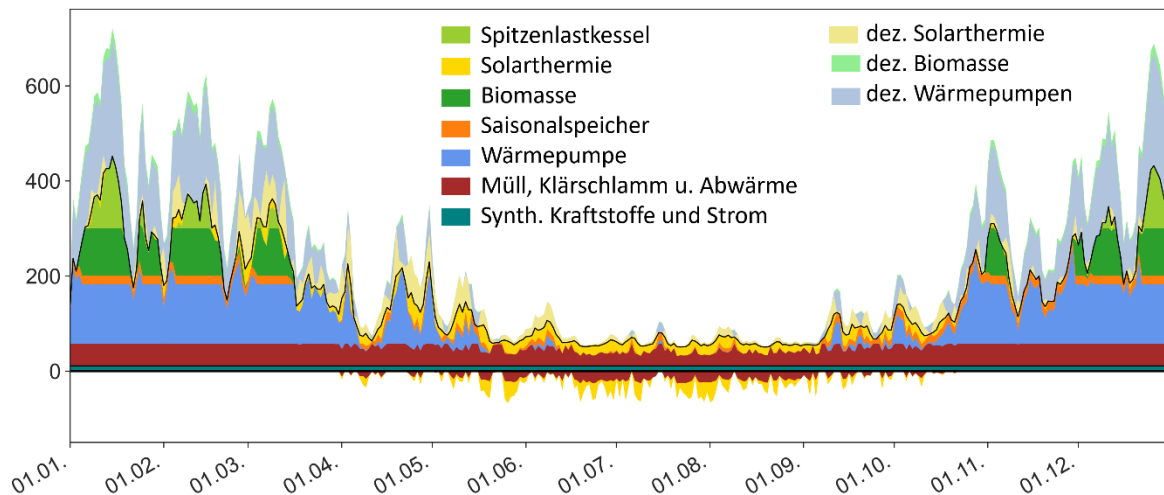


Abbildung 6: Lastprofil des 60%-Szenarios mit allen verwendeten Wärmeerzeugern

## Variation des Speichervolumens

In Abbildung 7 ist das Speichervolumen über dem Anteil Solarthermie an der Wärmeversorgung für Fernwärmeanteile am Gesamtwärmeverbrauch zwischen 27 % und 70 % aufgetragen.

Da bei einem steigenden Fernwärmeausbau (höherem sommerlichen Wärmeverbrauch) weniger Speicherkapazität für die Grundlast benötigt wird, steht sie für eine zunehmende Bereitstellung von Solarwärme zur Verfügung. Für eine Speichergröße von ca. 1 Mio. m<sup>3</sup> kann bei einem 70 %-tigen Fernwärmeanteil der Anteil Solarthermie an der Gesamtwärmeversorgung auf bis zu ca. 7,5 % erhöht werden.

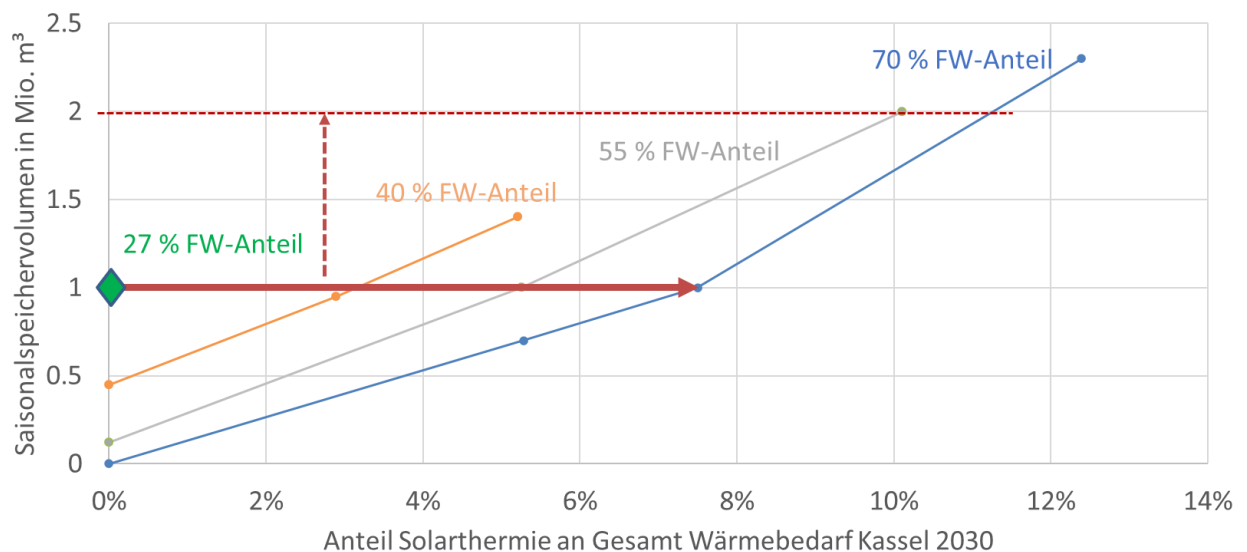


Abbildung 7: Potenzial Solarthermie in Abhängigkeit des Speichervolumens und des Ausbaus von netzgebundener Wärmeversorgung

Bei einem Fernwärmeanteil von 60 % ergeben sich genügend Speicherkapazitäten, um ca. 120 GWh/a Solarwärme bereitzustellen, was bei einem spezifischen Kollektorsertrag von 400 kWh/m<sup>2</sup>a einer Kollektorfläche von 300.000 m<sup>2</sup> entspricht. Damit kann 6 % des Gesamtwärmebedarfs in Kassel bzw. 10 % der Fernwärme gedeckt werden.

In einer Machbarkeitsstudie für das Wärmeversorgungssystem der Stadt Graz wurde eine Kollektorfläche von ca. 500.000 m<sup>2</sup> ermittelt (Reiter et al. 2016). Allerdings weisen selbst die derzeit größten existierenden Solarthermieanlagen noch deutlich kleinere Kollektorflächen auf. Zum Beispiel speist in Silkeborg, DK, eine der weltweit größten Solaranlagen mit einer Kollektorfläche von ca. 156.000 m<sup>2</sup> in das Fernwärmenetz ein.

## **Strombedarf**

Der Einsatz von Wärmepumpen setzt die Verfügbarkeit von Strom aus regenerativen Energien voraus. Zum Beispiel ergibt sich für das oben dargestellte Szenario mit einem Fernwärmeanteil von 55 % ein jährlicher Gesamtstrombedarf für Groß-Wärmepumpen von 127 GWh und für dezentrale Wärmepumpen von 233 GWh. Im Rahmen eines von der Themenwerkstatt Energieversorgung des Klimaschutzrats Kassel erarbeiteten Stromkonzepts wurde unter Berücksichtigung dieses Wärmeszenarios und weiterem Strombedarf, zum Beispiel für die industrielle Wärmebereitstellung und die Mobilität, eine Erhöhung des Strombedarfs in der Stadt Kassel um 54 % gegenüber dem Jahr 2019 auf ca. 1,5 TWh für das Jahr 2030 abgeschätzt (Flügge et al., 2022). Der notwendige Zubau an Erzeugungskapazitäten könnte (bei anteiliger Zuordnung zum Stadtgebiet Kassel) mit ca. 260 Windenergieanlagen und einem Fotovoltaik-Zubau um rund 250 MW erfolgen, um rechnerisch in der Jahresbilanz den notwendigen Strom bereitzustellen.

## **Zusammenfassung und Fazit**

Mithilfe von Energieverbrauchsdaten der Stadt Kassel wurde ein gebäudescharfer Wärmeatlas entwickelt, auf dessen Basis Szenarien zur Wärmebedarfsentwicklung für die verschiedenen Verbrauchssektoren erstellt wurden. Bei einer Verdoppelung der heutigen Sanierungsrate auf 2 %, einer Sanierungstiefe von 50 %, sowie der Berücksichtigung weiterer Einflussfaktoren ergibt sich ein Wärmebedarfsrückgang von ca. 17 % bis 2030 im Vergleich zu 2019.

Um hohe Deckungsraten regenerativer Energien zu erreichen, wird unter anderem eine Verdichtung und ein Ausbau des Fernwärmenetzes auf ca. 60 % des Gesamtwärmebedarfs der Stadt Kassel betrachtet. Mittels eines Algorithmus wurden geeignete Fernwärmegebiete ausgewiesen. Als Parameter dienen zunächst die Wärmebelegungsdichte sowie die räumliche Nähe der Gebiete zum Fernwärmenetz. Weitere Kriterien wie Kostentreiber und sozioökonomische Kriterien wurden ebenfalls betrachtet und sollen nach weiteren Untersuchungen in die Algorithmen implementiert werden.

Die Festlegung des Fernwärme-Anteils wirkt sich stark auf die Auslegung des Erzeugerparks und insbesondere auf den Bedarf saisonaler Speicherkapazitäten aus.

Für die Fernwärmeversorgung wurde für Kassel ein mittelfristiges Potenzial für die Müll-, Klärschlamm- und Altholzverbrennung sowie industrielle Abwärme von ca. 600 GWh/a ermittelt. Für die Abdeckung von Spitzenlasten wurden Biogasanlagen berücksichtigt. Mit vereinfachten Bilanzmodellen wurde ein Speichervolumen von ca. 1 Mio m<sup>3</sup> ermittelt, um die Überschusswärme aus den Verbrennungsprozessen zunächst für das bestehende Fernwärmesystem zu nutzen und um bei einem Fernwärmeausbau sukzessive Großwärmepumpen und Solarwärme in das zentrale Wärmeversorgungssystem zu integrieren. Bei einem Fernwärmeanteil von 60 % am Gesamtwärmeverbrauch ist die Speicherkapazität ausreichend, um einen Solarthermieanteil von ca. 6 % am Gesamtwärmebedarf (10 % am Fernwärmebedarf) in Kassel zu erzielen.

Das Ziel, schon bis 2030 das Wärmeversorgungssystem in Kassel ohne die Energieträger Kohle, Erdöl und Erdgas zu betreiben, erweist sich als äußerst ambitioniert. Sämtliche Energieeinspar- und Bereitstellungspotenziale müssen zügig voll ausgeschöpft werden. Dies betrifft zum Beispiel eine breit angelegte Gebäudesanierung, die Installation innovativer Wärmeversorgungssysteme in Gebäuden und die Bereitstellung weiterer Ressourcen und zentraler Infrastruktur, wie zum Beispiel den Ausbau von Wärmenetzen, die Installation von Großwärmepumpen und Erschließung geeigneter Niedertemperaturquellen, die Bereitstellung großer Flächen und die Installation von Solarthermieanlagen und Speichern. Insbesondere für Solarthermieanlagen und Erdbecken-Saisonspeicher sind Anlagengrößen notwendig, die zwar schon vereinzelt projektiert, in dieser Größe aber noch nicht umgesetzt worden sind. Auch die Bereitstellung des notwendigen regenerativ erzeugten Stroms wird in den kommenden Jahren eine große Herausforderung.

## **Ausblick**

Im weiteren Verlauf des Forschungsvorhabens sollen unter anderem folgende Themen in Zusammenarbeit mit dem Energieversorger, der Stadt Kassel und weiteren Akteuren bearbeitet werden:

- Berücksichtigung weiterer technischer, ökonomischer und sozioökonomischer Faktoren für die Bewertung von Fernwärme-Vorranggebieten,
- Prüfung der Umsetzbarkeit und Priorisierung von Fernwärme-Vorranggebieten,
- Kostenvergleich der betrachteten Szenarien,
- Untersuchung von Potenzialen für die Erschließung von Wärmequellen für Großwärmepumpen und
- Erstellung eines Maßnahmenpakets für den Transformationsprozess

## Literaturverzeichnis

Dieckmann, Jochen; Trutzel, Klaus (1991): Deutscher Städtetag 1991. Kommunale Gebietsgliederung.

Egelkamp, Robert; Wett, Lina; Kallert, Anna Marie Dr.-Ing. (2021): Potenzialstudie klimaneutrale Wärmeversorgung Berlin 2035. Analyse erneuerbarer Wärmepotenziale für eine klimaneutrale Wärmeversorgung in Berlin bis 2035.

Flügge, Thomas et al. (2022): "Klimaneutrale Energieversorgung Kassels - Rahmendaten Stromsektor", Klimaschutzrat der Stadt Kassel.

Gerhardt, Norman; Ganal, Irina; Jentsch, Mareike Dr. (2019): Entwicklung der Gebäudewärme und Rückkopplung mit dem Energiesystem in -95 % THG Klimazielszenarien.

Hinz, Andreas; Orozaliev, Janybek Dr.; Vajen, Klaus Prof. Dr. (2020): Effizienzoptimierung und Perspektiven der Fernwärme Kassel. Kurzfassung des Abschlussberichts, Juli 2020.

Kicherer, Nina; Lorenzen, Peter; Schäfers, Hans (2021): Design of a district heating roadmap for Hamburg. In: *Smart Energy* 2, S. 100014. DOI: 10.1016/j.segy.2021.100014.

Kuhlmann, Andreas (2019): Statistiken und Analysen zur Energieeffizienz im Gebäudebestand. Dena Gebäudereport 2019.

Maaß, Christian; Freiburger, Leona; Sandrock, Matthias Dr. (2021): Grüne Fernwärme für Deutschland. Potenziale, Kosten, Umsetzung, 08.03.2021.

Peters, Max Dr. (2020): Leitfaden Kommunale Wärmeplanung.

Reiter, Patrick; Poier, Hannes; Holter, Christian (2016): BIG Solar Graz: Solar District Heating in Graz – 500,000 m<sup>2</sup> for 20 % Solar Fraction. In: *Energy Procedia* 91, S. 578–584. DOI: 10.1016/j.egypro.2016.06.204.

Riechel, Robert; Walter, Jan (2022): Kurzgutachten Kommunale Wärmeplanung.

Ekaterini Tziggili, Thomas Schmidt, Dirk Mangold (2013): "Gesamtbetrachtung zu solaren saisonalen Wärmespeichern und mögliche multifunktionale Nutzungen". Forschungsbericht zum BMU-Vorhaben 0325976A.

Städtische Werke Kassel (2020): Kohleausstieg schon 2025: Neue Anlage im Fernwärmekraftwerk. Online verfügbar unter <https://www.sw-kassel.de/ueberuns/kommunikation/aktuelles/einzelansicht/kohleausstieg-schon-2025-neue-anlage-im-fernwaermekraftwerk/>, zuletzt aktualisiert am 25.03.2022.

Thamling, Nils; Langreder, Nora (2020): Perspektive der Fernwärme.

van Helden, Wim (2022): Giga-scale thermal energy storage for renewable districts.

Weinhold, Katja; Rühling, Karin (2019): Green Heat 3. Entwicklung innovativer Energieversorgungstechniken und –strukturen mit den Kernkomponenten modularer Großwärmespeicher und Maxianlage Solarthermie.