



# **Effizienzoptimierung und Perspektiven der Fernwärme Kassel**

**Kurzfassung des Abschlussberichts**

Antragsnummer: E/611/71268262

**Autoren:**

A. Hinz, J. Orozaliev, K. Vajen

Institut für Thermische Energietechnik  
Universität Kassel

Kassel, Juli 2020

**WI  Bank**

Wirtschafts- und Infrastrukturbank Hessen

**HESSEN**

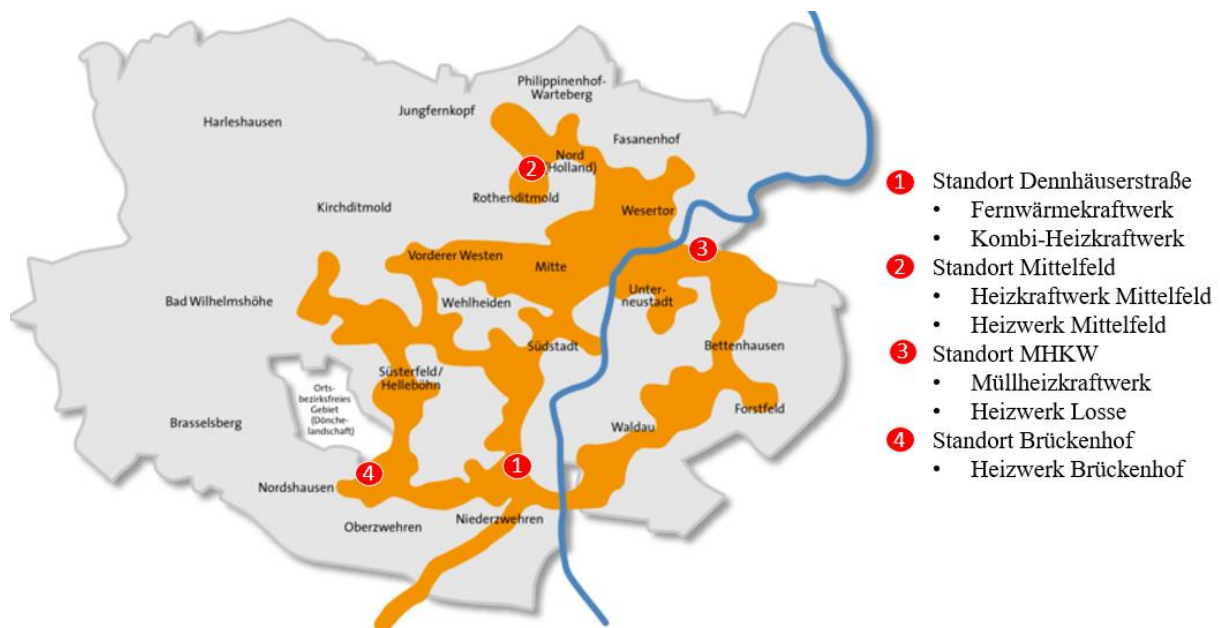


Gefördert vom Hessischen Ministerium für Wirtschaft, Energie, Verkehr und Wohnen nach dem Hessischen Energiegesetz. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

## Einleitung

Die energie- und klimapolitischen Zielsetzungen stellen Fernwärmesysteme vor besondere Herausforderungen. Zum einen wird von einem langfristig sinkenden Wärmeabsatz aufgrund der Sanierung im Gebäudebestand und Effizienzsteigerungen ausgegangen. Zum anderen werden sich die Fernwärmesysteme auch an die dynamischen Randbedingungen im Strommarkt anpassen müssen. Um die Effizienz und Nachhaltigkeit der netzgebundenen Wärmeversorgung dabei sukzessiv zu erhöhen, ist eine langfristige Transformationsstrategie für Fernwärmesysteme erforderlich. Ansätze wurden in Forschungsprojekten erarbeitet. Durch die hohe Individualität der Fernwärmesysteme bedarf es allerdings immer der Analyse der lokalen Bedingungen, um konkrete Maßnahmen mit entsprechender Priorität für eine Transformationsstrategie zu identifizieren.

Das Ziel dieses Forschungsvorhabens ist die Erarbeitung einer Transformationsstrategie für das Fernwärmesystem in Kassel. Die Fernwärme in Kassel deckt rund einen Viertel des Wärmebedarfs der Stadt und gehört mit 468 GWh jährlichem Wärmeabsatz und einer Trassenlänge von 175 km (2015) zu den großen Fernwärmesystemen in Deutschland. Die Fernwärmeversorgung der ungefähr 2100 Netzanschlüsse erfolgt nahezu ausschließlich durch Kraft-Wärme-Kopplung (KWK)-Anlagen mit einem differenzierten Brennstoffeinsatz.



**Abbildung 1: Schematische Darstellung des Wärmenetzes inkl. Erzeugerstandorten**

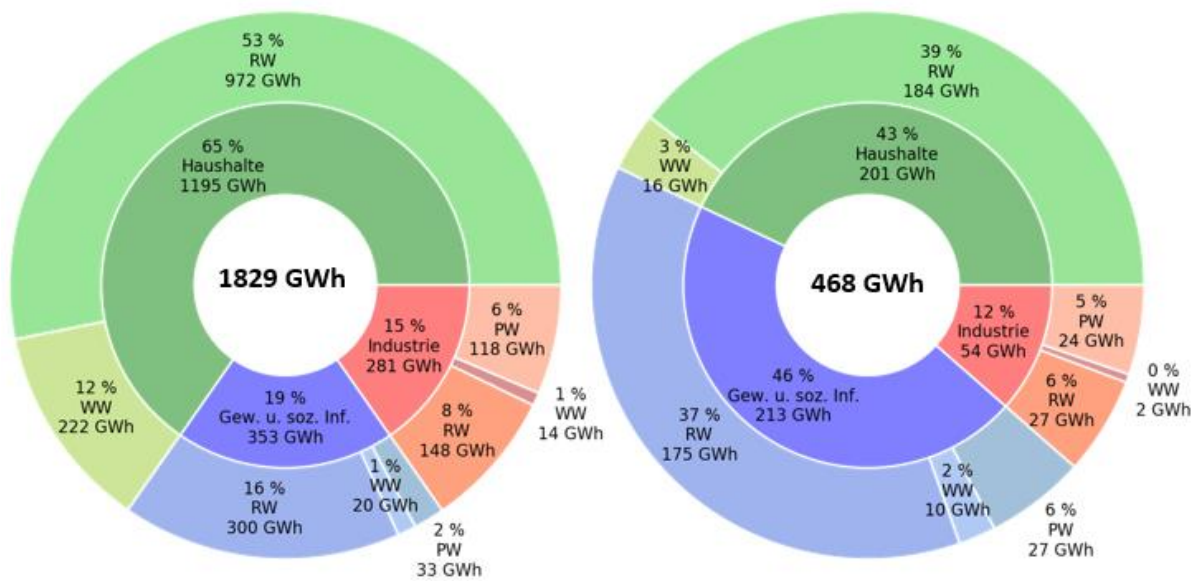
Für die Erarbeitung einer Transformationsstrategie erfolgte zunächst die Analyse und Bewertung des Ist-Zustands. Diesbezüglich wurde die gesamte Versorgungskette von den Fernwärmekunden an, über das Wärmenetz zu den Wärmeerzeugern unabhängig voneinander betrachtet und die Merkmale und Schwachstellen herausgearbeitet. Anschließend wurden Herangehensweisen und Methoden entwickelt, um ein zukünftiges Leitbild näher beschreiben zu können. Dabei wurde die Interaktion der einzelnen Glieder der Versorgungskette untersucht.

Dazu gehört beispielsweise die Auswirkungen der Wärmebedarfsentwicklung der Bestandskunden oder Neukunden auf das Wärmenetz oder die Wärmeerzeuger. Aufbauend auf dem Leitbild wurden konkrete Maßnahmen für eine Transformationsstrategie abgeleitet.

## **Wärmebedarfsentwicklung**

Für die Analyse der zukünftigen Wärmebedarfsentwicklung von Fernwärmebestandskunden und potenziellen Neukunden wurde ein gebäudescharfer Wärmeatlas für die Stadt Kassel erstellt. Hierzu wurden zahlreiche Datenquellen miteinander verschnitten. Diese Daten beinhalten Gebäudedaten (Baujahre, Flächen), Gebäudenutzungsinformationen (Wohnen, GHD, Industrie), Verbrauchsdaten differenziert nach Fernwärme- und Erdgas-Bezug sowie Informationen über Gebäude, die Öltanks installiert haben. Insgesamt enthält die Datenbasis ca. 34.000 Gebäude mit unterschiedlichen Attributen. Neben der Verbesserung der Zuordnung der Daten über Plausibilitätsprüfungen, lag ein besonderer Fokus in der Erstellung des Wärmeatlases und dort im Speziellen beim Umgang mit Datenlücken (keine Gebäudedaten oder kein Verbrauch). So wurden fehlende Daten eines Gebäudes anhand der Nachbargebäude vervollständigt. Es wurde somit unterstellt, dass sich z.B. das Baujahr oder die Stockwerke von zwei angrenzenden Gebäuden oder Nachbargebäuden nicht stark unterscheiden. Neben der Ermittlung der Abstände zwischen zwei Gebäuden über ihre Koordinaten (bzw. des Gebäudeschwerpunkts) wurden neue Berechnungsalgorithmen entwickelt, die zusammenhängende Gebäude (z.B. Doppelhäuser, Reihenhäuser, etc.) über ihre Umrisse automatisiert erkennen. Mit dieser Methode wurde ebenfalls der Verbrauch von Gebäuden (Öl und sonstige) abgeschätzt, indem der spezifische Verbrauch der Nachbargebäude herangezogen wurde. Lediglich bei 100 Gebäuden konnten keine Verbrauchswerte auf diese Weise ermittelt werden. In diesen Fall wurde ein Verbrauch von 25 MWh/a angenommen, was etwa dem Jahreswärmeverbrauch eines Einfamilienhauses entspricht. Somit konnte eine umfassende Datenbasis für alle Gebäude in der Stadt Kassel erstellt werden.

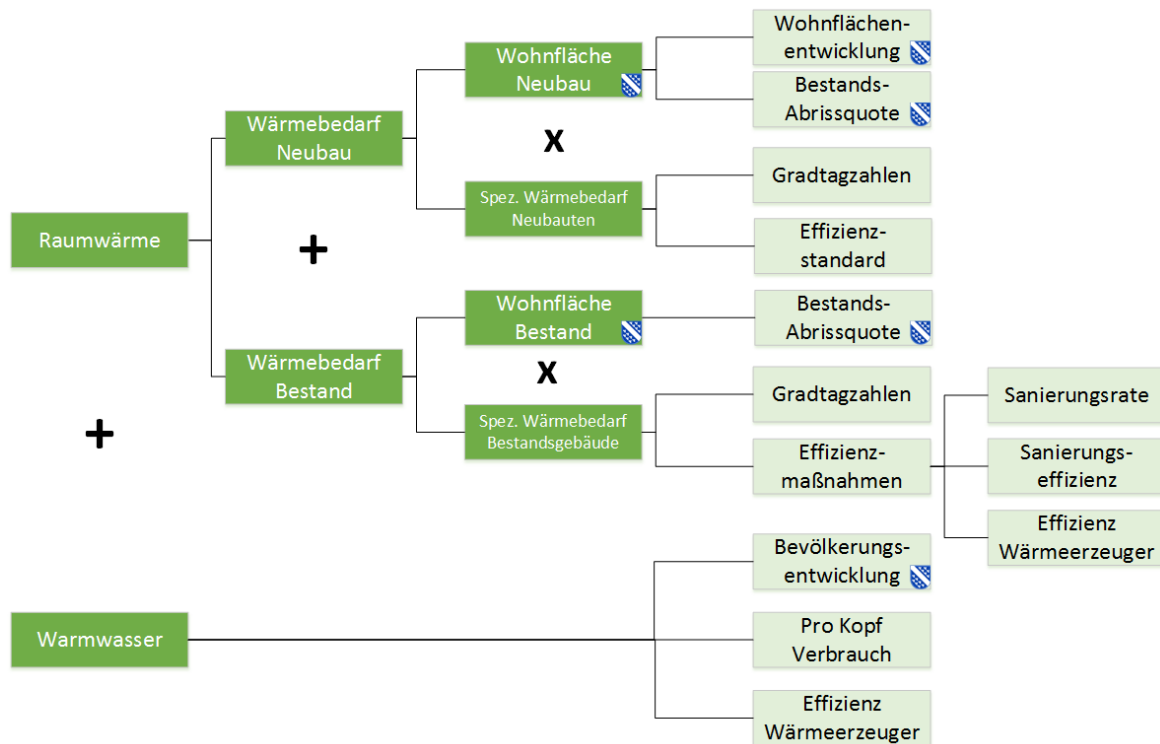
Der Gesamtwärmeverbrauch 2015 in Kassel von insgesamt 1.830 GWh pro Jahr wurde zu 56 % durch Gas und zu 26 % durch Fernwärme sowie Öl und sonstige (16 %) oder Energiedienstleistungen (2 %) gedeckt. In der folgenden Abbildung sind der Gesamtverbrauch der Stadt Kassel (links) und der Fernwärmeverbrauch (rechts) nach Sektoren und ihren Wärmeanwendungen aufgeteilt. Fast zwei Drittel des Gesamtwärmeverbrauchs in Kassel entfällt auf Haushalte bzw. Wohngebäude, 19 % auf Gewerbe, Handel und Dienstleistung (GHD) sowie 15 % auf produzierende Industrie. In Abhängigkeit der Gebäudenutzung und des Energieträgers wurden die Wärmeanwendungen (Raumwärme (RW), Warmwasser (WW) und Prozesswärme (PW)) mit Hilfe von statistischen Werten in der Literatur ermittelt. Bezüglich der Wärmeanwendungen machen in der Stadt Kassel Raumwärme in Haushalten (53 %) und GHD (16 %) sowie Warmwasser (12 %) in Haushalten die wesentlichen Anteile aus. Insgesamt macht Raumwärme einen Anteil von 78 % aus. Im Unterschied zur gesamten Stadt Kassel liegt der Anteil von GHD Kunden in der Fernwärme bei ca. 46 % und damit sogar höher als der Anteil von Wohngebäuden (43 %). Der Anteil von Industrie liegt bei ca. 12 %. Über Fernwärme wird dabei vor allem Raumwärme (83 % der Wärmeanwendungen) bereitgestellt.



**Abbildung 2: Kundenstruktur-Analyse in Bezug auf den Wärmebedarf der Stadt Kassel (links) und der Fernwärme (rechts) nach Sektoren und ihren Wärmeanwendungen Raumwärme (RW), Warmwasser (WW) und Prozesswärme (PW)**

Die deutschlandweiten Szenarien für die zukünftige Wärmebedarfsentwicklung lassen sich nur bedingt auf die Stadt Kassel runterskalieren, da lokalspezifische Randbedingungen der Stadt Kassel unberücksichtigt bleiben. Dazu gehören bspw. die Bevölkerungs- und Erwerbstätigenentwicklung oder die Wohnflächenentwicklung. Die spezifischen Prognosen für die Stadt Kassel unterscheiden sich deutlich von den bundesweiten Trends.

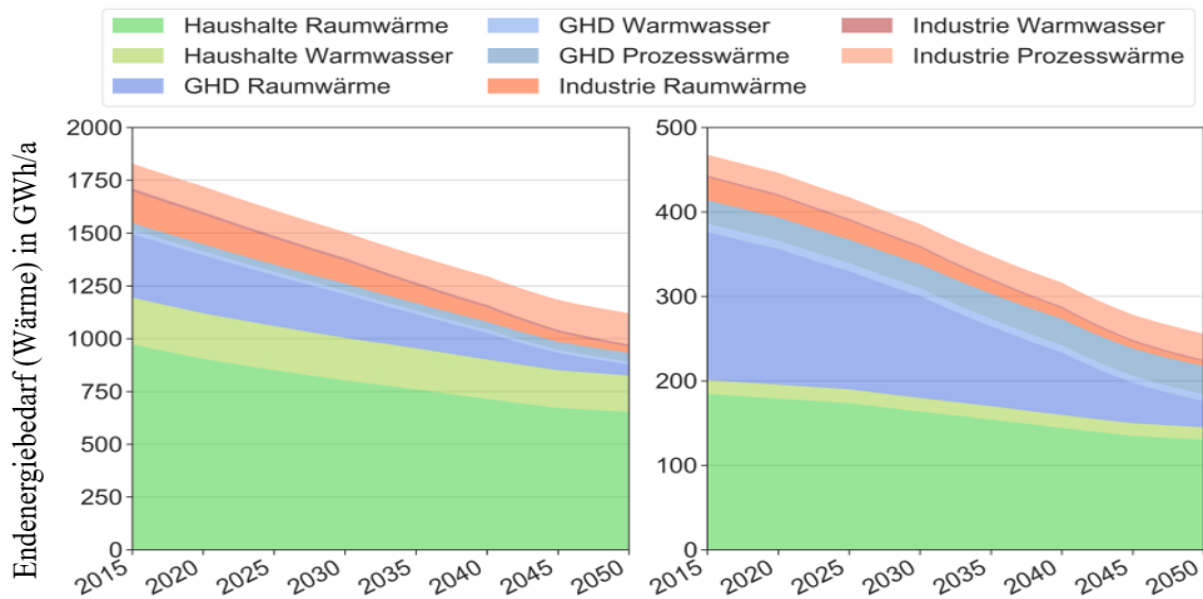
Um standortspezifische Randbedingungen zu berücksichtigen wurde eine bottom-up-Methode für die Erstellung von Szenarien für die zukünftige Wärmebedarfsentwicklung entwickelt. Hierbei werden für jeden Sektor und jede Wärmeanwendung Treiber für die Änderung des Wärmebedarfs definiert und standortspezifisch quantifiziert. In Abbildung 3 ist beispielhaft ein Teilmodell für den Sektor Haushalte dargestellt, das die Wohnflächen- (Neubau und Abriss) und die Bevölkerungsentwicklung nach der Prognose der Stadt Kassel, Sanierungsrate und -tiefe für den Bestand sowie langfristige klimatische Änderungen berücksichtigt.



**Abbildung 3: Anwendungen und Treiber für den Sektor Haushalte**

Die Ergebnisse der Wärmebedarfsentwicklung der Stadt Kassel und der Fernwärme von 2015 bis 2050 sind in der folgenden Abbildung dargestellt. Es ist zu erkennen, dass sich der Wärmebedarf der Stadt Kassel im erstellten Szenario bis Jahr 2050 um 39 % senken wird. Trotz steigender Wohnfläche verringert sich der Raumwärmebedarf, da der Raumwärmebedarf der Neubauten verhältnismäßig gering ist und Bestandsgebäude saniert werden. Außerdem verringert sich die Gradtagzahl, die den gesamten Raumwärmebedarf der Sektoren beeinflusst. Die einzige Wärmeanwendung, die steigenden Bedarf aufweist, ist die Prozesswärme der Industrie, aufgrund steigender Bruttowertschöpfung und verhältnismäßig geringer Reduktion der Brennstoffintensität.

Der Wärmebedarf der aktuellen Fernwärmekunden sinkt im Gegensatz zum Gesamtwärmebedarf der Stadt Kassel noch deutlicher um insgesamt 45 %. Dieser Umstand ist insbesondere auf den hohen Anteil des Sektors GHD bzw. dem hohen Anteil der öffentlichen Einrichtungen zurückzuführen. Aufgrund höherer Abriss- und Neubauraten wird in Nicht-Wohngebäuden schneller ein signifikant niedrigerer Endenergieverbrauch für Raumwärme realisiert.



**Abbildung 4 Wärmebedarfsentwicklung der Stadt Kassel (links) und der Fernwärme (rechts) unterteilt nach Anwendungen der Sektoren**

## Wärmeerzeuger

Insgesamt gibt es vier Einspeisestandorte, die das Kasseler Wärmenetz mit Wärme versorgen (siehe Abbildung 1). Bei einer maximalen Einspeisung im Jahr 2015 von 187 MW<sub>th</sub> bei -8,7 °C ist aktuell eine thermische Nennleistung von 370 MW<sub>th</sub> installiert. Von der gesamten thermischen Nennleistung sind 190 MW<sub>th</sub> auf vier KWK- Anlagen zurückzuführen.

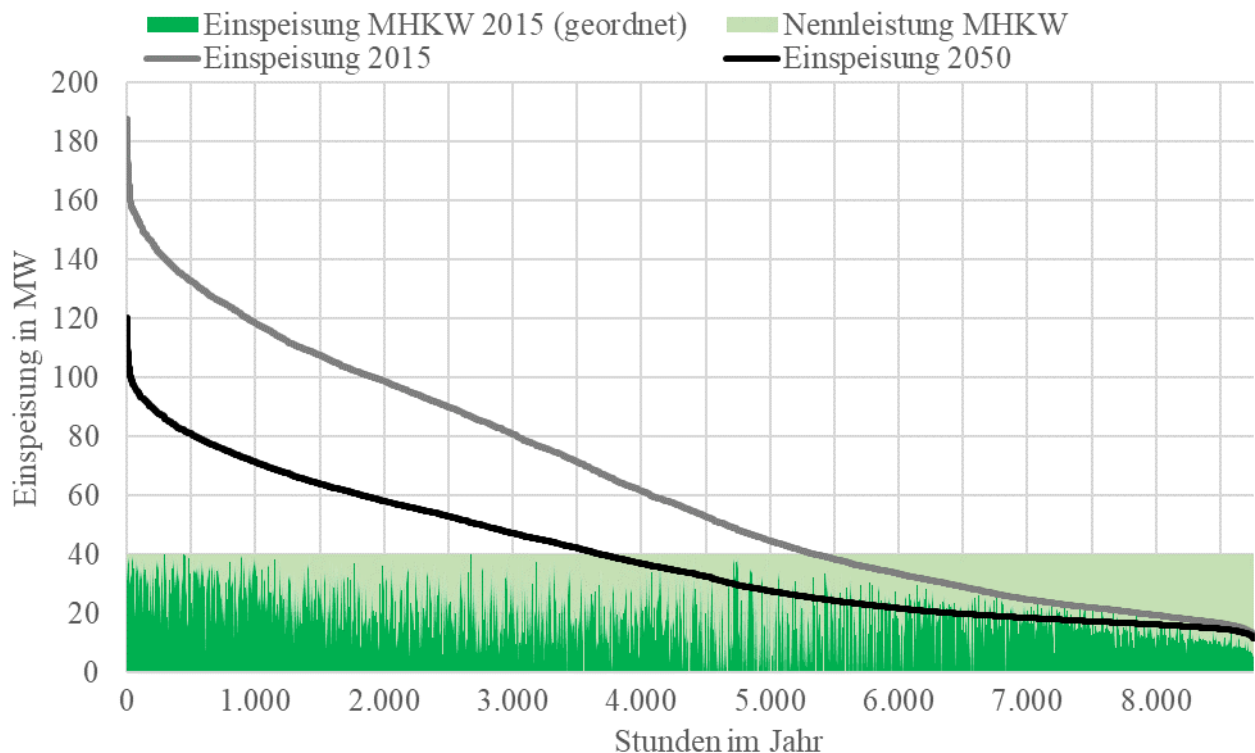
Müllheizkraftwerk Kassel		Kraftwerk Dennhäuser Straße		Kombi-Heizkraftwerk Kassel		Heizkraftwerk Mittelfeld	
Brennstoffe	Abfall	Brennstoffe	Diverse	Brennstoffe	Erdgas	Brennstoffe	Biomasse
Baujahr	1968	Baujahr	1987	Baujahr	1986	Baujahr	1988
Elektrische Leistung	17,7 MW	Elektrische Leistung	38,0 MW	Elektrische Leistung	52,9 MW	Elektrische Leistung	9,5 MW
Thermische Leistung	40 MW	Thermische Leistung	80,0 MW	Thermische Leistung	74,6 MW	Thermische Leistung	16,0 MW

**Abbildung 5: Übersicht der KWK-Anlagen der Städtische Werke AG**

Um sich dem Leitbild für den Wärmeerzeugerpark anzunähern, wurden die Auswirkungen der Wärmebedarfsentwicklung der Bestandsfernwärmekunden auf den Lastgang der



Wärmeinspeisung bis zum Jahr 2050 ermittelt. Der Lastgang ist ein wesentlicher Eingangsparameter bei der Einsatz- und Investitionsplanung des Wärmeerzeugerparks. Eine Akquise von Fernwärme-Neukunden wurde zunächst nicht berücksichtigt.



**Abbildung 6: Jahresdauerlinie der stündlichen Fernwärmeeinspeisung im Jahr 2015 und 2050 und thermische Nennleistung des Müllheizkraftwerk**

Es zeigt sich, dass zukünftig deutlich weniger Wärmeerzeugerkapazität vorgehalten werden muss. Außerdem wird deutlich, dass die Auslastung der aktuell bereits gering ausgelasteten KWK-Anlagen nochmals deutlich sinkt. Es besteht Handlungsbedarf, auch vor dem Hintergrund, dass bis 2030 hohe Ersatzinvestitionen in die bestehenden KWK-Anlagen notwendig sind. Das Müllheizkraftwerk (MHKW) könnte zukünftig die Grundlast decken, da es auch zukünftig für die Kreislaufwirtschaft der thermischen Verwertung bedarf. Diesbezüglich zeigt sich, dass das MHKW bei konstanter thermischer Leistung und maximaler Wärmeauskopplung bis zu 75 % der Fernwärmeeinspeisung decken könnte. Das MHKW würde somit die tragende Säule der Fernwärmeversorgung darstellen. Weitere Erzeuger würden weniger als 3.000 Stunden im Jahr einspeisen. Dies ist eine wesentliche Randbedingung für die anstehende Investitionsentscheidung. Mögliche Handlungsoptionen zur Deckung des restlichen Fernwärmebedarfs sind beispielsweise die Nutzung von Spitzenlastkesseln oder die Investition in modulare KWK-Einheiten. Investitionsintensivere Wärmeerzeuger sollten Geschäftsmodelle nutzen, die über den Wärme- und Stromverkauf hinaus gehen. Dazu gehört die energetische Verwertung von z.B. Klärschlamm. Die Städtische Werke AG hat die energetische Verwertung von Klärschlamm wirtschaftlich geprüft. Darauf basierend wurde der Entschluss gefasst, das Fernwärmeheizkraftwerk für die energetische Verwertung von Klärschlamm mit einer Entnahmekondensationsturbine umzurüsten. Das Fernwärmekraftwerk ist anschließend in der

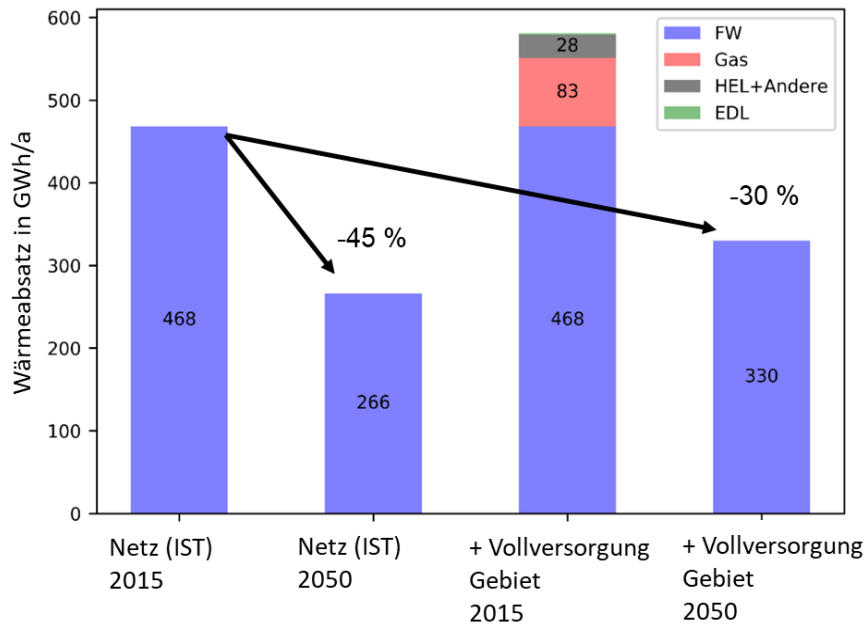
Lage, unabhängig von der Entwicklung des Fernwärmeabsatzes, den Klärschlamm energetisch zu verwerten. Im Zuge der energetischen Verwertung von Klärschlamm ist der Kohleausstieg in Kassel bereits zum Jahr 2025 geplant. Dadurch ist auch zukünftig ein niedriger Primärenergiefaktor zu erwarten. Bei dem erwarteten Fernwärmebedarf der Bestandskunden und der genannten strategischen Ausrichtung des Wärmeerzeugerparks, würde die Einbindung von industrieller Abwärme und Solarthermie nicht mit Priorität verfolgt.

## **Wärmenetz**

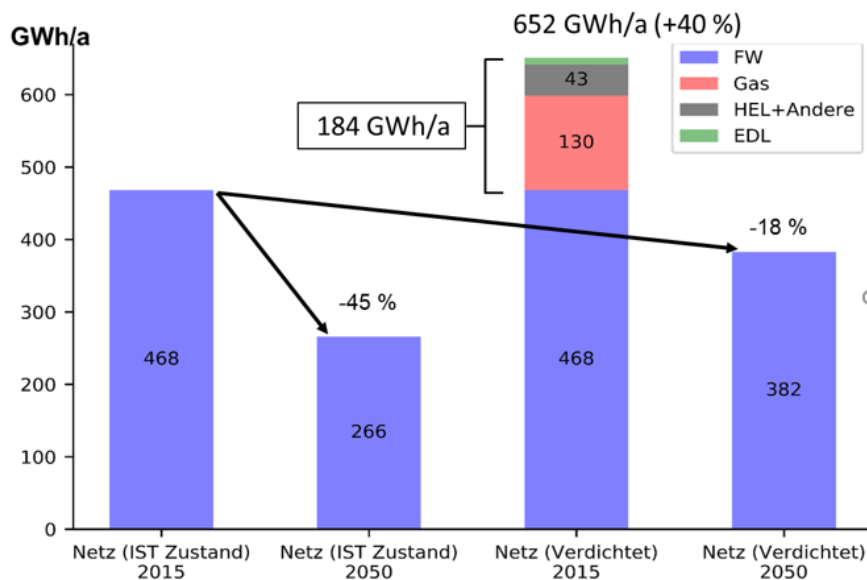
Um sich einem Leitbild anzunähern, wurde der Wärmeetlas zu einem Planungsinstrument für das Fernwärme- und Gasnetz weiterentwickelt. Bisher wurden die Geo-Information-System (GIS)-Daten der Netzinfrastrukturen ohne technischen und wirtschaftlichen Parameter implementiert. Hierdurch konnten bereits Bewertungen der Infrastrukturen für das Jahr 2015 und 2050 erfolgen als auch Szenarien für eine spartenübergreifende Netzstrategie analysiert werden. Es zeigte sich zunächst, dass das Fernwärme- und Gasnetz insbesondere in der Innenstadt und im Stadtteil Vorderer Westen parallel liegen. Aufgrund der hohen Wärmebedarfsdichte in diesen Gebieten ist die Wärmelinien- und Gasnetzdichte in den Abschnitten allerdings nicht auffällig niedrig. Im Zuge der Wärmebedarfsentwicklung der Fernwärmebestandskunden bzw. der Stadt Kassel stellt sich die Frage, wie eine spartenübergreifende Netzstrategie gestaltet werden kann, um eine hohe Auslastung beider Netze zu gewährleisten und beispielsweise den Fernwärmebedarfsrückgang zu kompensieren. Typischerweise werden bei einer Netzstrategie recht große Areale als Fernwärmevorranggebiete durch kommunale Satzungen ausgewiesen. Ein analysiertes Szenario war die Ausweisung eines Vorranggebietes bzw. die Fernwärmefullversorgung eines Stadtteils am Beispiel des Stadtteils Vorderer Westen. Bei dieser Untersuchung zeigte sich, dass durch diese Maßnahme der Fernwärmebedarfsrückgang der aktuellen Bestandskunden bis 2050 zu einem Drittel kompensiert werden würde (vgl. Abbildung 7). Es zeigte sich auch, dass die starke Reduktion der Wärmelinien- und Gasnetzdichte von 2.660 kWh/(m·a) im Jahr 2015 auf ca. 1.500 kWh/(m·a) bis zum Jahr 2050 durch die Fullversorgung des Vorderen Westens durch zusätzliche Leitungen kaum verändert wird.

Ein zweites Szenario untersuchte das Verdichtungspotential der Fernwärme im Umkreis von 40 m von den aktuell bestehenden Netzleitungen. In diesem Szenario zeigte sich, dass der Bedarfsrückgang der Fernwärmebestandskunden zu zwei Dritteln kompensiert werden könnte (vgl. Abbildung 8). Darüber hinaus wird die Reduktion der Wärmelinien- und Gasnetzdichte bis zum Jahr 2050 mit 1.800 kWh/(m·a) leicht gemildert.





**Abbildung 7: Fernwärmebedarf der gesamten Stadt 2015 und 2050 für das aktuelle Netz und die Variante mit Vollversorgung des Vorranggebietes**



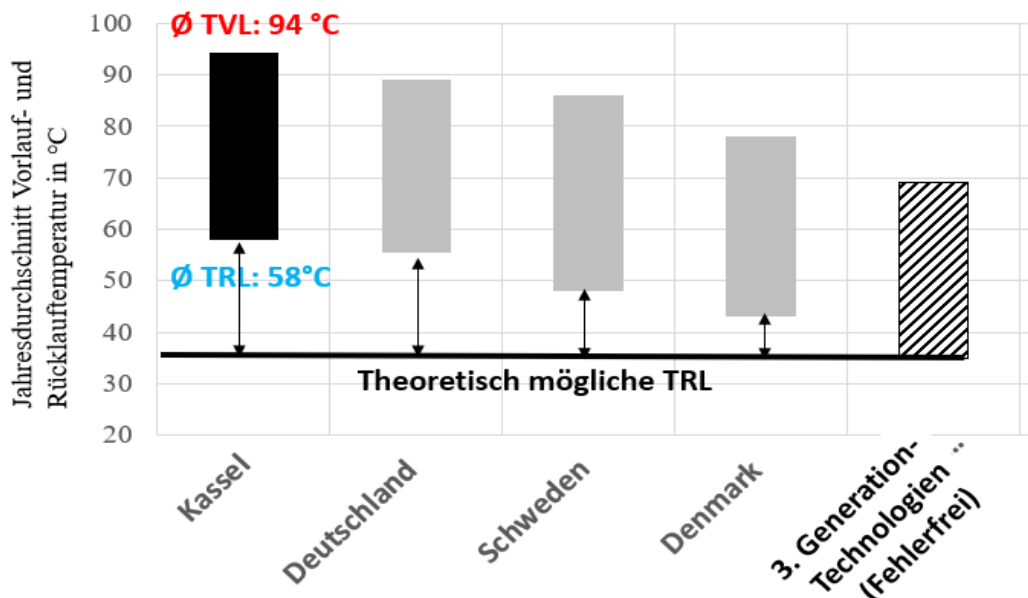
**Abbildung 8: Fernwärmebedarf ohne/mit Verdichtung im Umkreis von 40 m der aktuellen Netzleitungen im Jahr 2015 und im Jahr 2050**

Es kann somit festgestellt werden, dass im Zuge der Wärmebedarfsentwicklung die Wärmelinien-dichte deutlich sinken wird. Dies hat zur Folge, dass zukünftig bei unveränderten Netztemperaturen die relativen Wärmeverluste steigen. Mögliche Handlungsoptionen auf Basis der bisherigen Untersuchungen sind vielfältig. Zum einen ist es möglich, mit dem Wärmeetlas als Planungsinstrument eine spartenübergreifende Netzstrategie anzugehen. Dabei würde die Integration von wirtschaftlichen Randbedingungen der Netze differenziertere Ergebnisse

ermöglichen. Zum anderen kann die Entwicklung der steigenden relativen Wärmeverluste begrenzt werden, indem Maßnahmen zur Senkung der Netztemperaturen eingeleitet werden.

### Absenkung der Netztemperaturen

Die Netztemperaturen sind von einer Vielzahl von Faktoren abhängig. Zum einen haben beispielsweise Kunden bestimmte Anforderungen an die Höhe der Vorlauf-temperatur (z.B. mindestens 90 °C für Absorptionskälteanlagen). Zum anderen ist die Vorlauf-temperatur ein Parameter, dessen Fahrweise das Ergebnis einer Betriebsoptimierung des Fernwärmesystems darstellt. Ein wesentlicher Parameter in dieser Optimierung ist die Rücklauf-temperatur. Die Höhe der Rücklauf-temperatur wird hauptsächlich von der Anlagentechnik der Kunden bestimmt. In Abbildung 9 sind die Durchschnittswerte der Vor- und Rücklauf-temperatur in Kassel im Vergleich dargestellt. Verglichen wird mit länderspezifischen Durchschnittswerten als auch mit Simulationsergebnissen einer fehlerfreien Kundenanlagentechnik, die der 3. Generation der Fernwärme bzw. dem Stand der Technik entspricht.



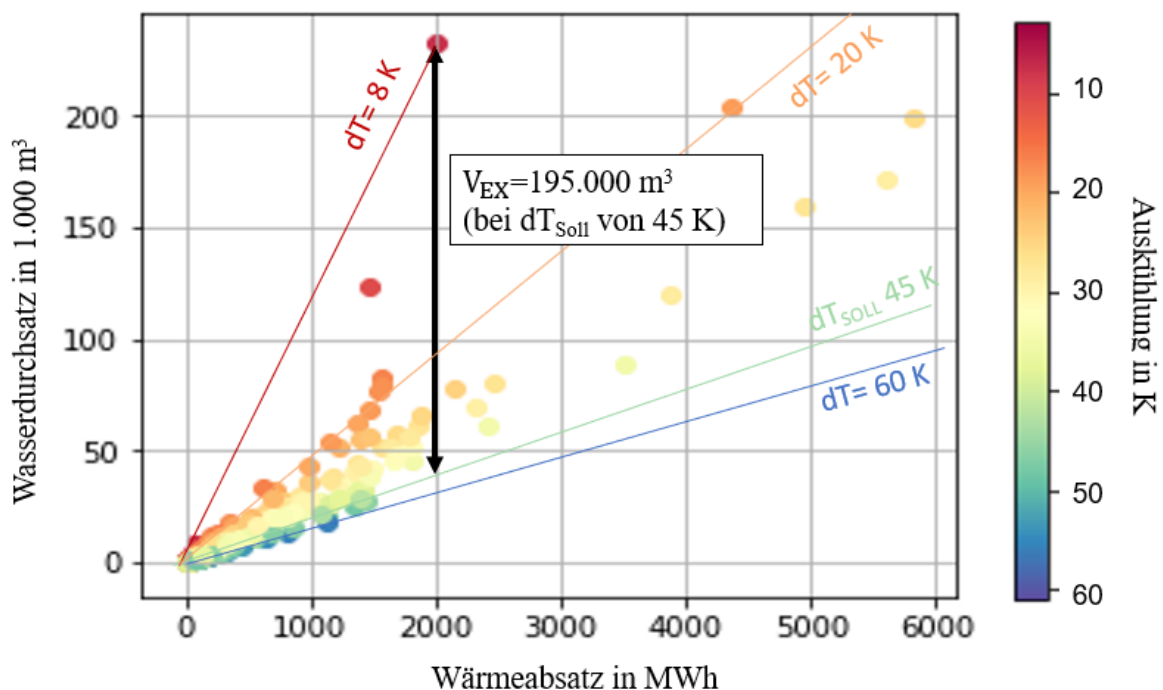
**Abbildung 9: Jahresdurchschnitt der Netztemperaturen von Fernwärmesystemen der 3. Generation im Vergleich zum theoretisch möglichen fehlerfreien Betrieb<sup>1</sup>**

Es ist zu erkennen, dass die Vorlauf-temperatur in Kassel höher liegt in Durchschnittswert in Deutschland. Grund hierfür sind die bereits erwähnten Absorptionskälteanlagen, die ein Mindesttemperatur von 90°C erfordern. Die Rücklauf-temperatur ist typisch für deutsche Netze, jedoch höher als in Skandinavien und deutlich höher als bei einem fehlerfreien Betrieb für die 3. Fernwärmegeneration theoretisch möglich. Es besteht somit Verbesserungspotential und es bedarf einer systematischen Herangehensweise zur Senkung der Netztemperaturen, welche die Individualität des Fernwärmesystems in Kassel berücksichtigt. Eine Senkung der

<sup>1</sup> Schmitt, Frieder; Hoffmann, Heinz-Werner; Göhler, Torsten (2005): Strategies to Manage Heat Losses. Technique and Economy und Helge Averfalk; Sven Werner; Clemens Felsmann; Karin Rühling; Robin Wiltshire; Svend Svendsen (2017): Transformation Roadmap from High to Low Temperature District Heating Systems. Annex XI final report. Hg. v. IEA District Heating and Cooling.

Rücklauf­temperatur hat ausnahmslos positive Auswirkungen auf ein Fernwärmesystem und wurde deshalb intensiv im Vorhaben betrachtet.

Da im vermaschten Kasseler Wärmenetz keine geregelten Bypässe verbaut wurden, sind die Fehler vor allem bei den Übergabestationen und den nachgelagerten Hausanlagen der Kunden zu suchen. Zur Identifizierung von Bestandskunden mit hohem Einfluss auf die erhöhte Rücklauf­temperatur wurde die schwedische „Excess-Flow-Methode“<sup>2</sup> herangezogen und weiterentwickelt. In dieser Methode wird anhand des jährlichen Wärme­verbrauchs und des Wasser­durchsatzes (Daten aus Wärme­mengen­zählern) der Mehr­durchsatz von Fernwärmewasser aufgrund geringer Auskühlung bewertet und damit der äquivalente Kurzschluss­volumenstrom für jede Station berechnet (vgl. Abbildung 10). Der Vorteil dieser Methode ist es, dass sowohl die Wärme­abnahme als auch die Auskühlung des Fernwärmewassers des Kunden berücksichtigt werden. So kann ein eindeutiges Ranking der Übergabestationen bzgl. der Auswirkung auf die Rücklauf­temperatur erstellt werden.



**Abbildung 10: Wasser­durchsatz, Wärme­absatz und Auskühlung im Jahr 2016 von 1.236 Stationen. Am Beispiel einer Station ist dargestellt, dass die äquivalente Kurzschluss­menge (excess flow) 195.000 m³ pro Jahr beträgt, die ungekühlt vom Vorlauf in den Rücklauf geht. Der Grund war der Ausfall der Regelung.**

Auf Basis des Excess-Flow-Rankings wurden insgesamt 24 Übergabestationen für eine Besichtigung und Fehlerdetektion ausgewählt. Zu den dabei versorgten Kunden gehören mehrere Standorte der Universität, Krankenhäuser, Industriegebiete und Gewerbe als auch Verwaltungsgebäude und Hotels sowie Areale von Mehrfamilienhäusern. Bei der Begehung wurde die Anlagentechnik und momentane Betriebsparameter aufgenommen und

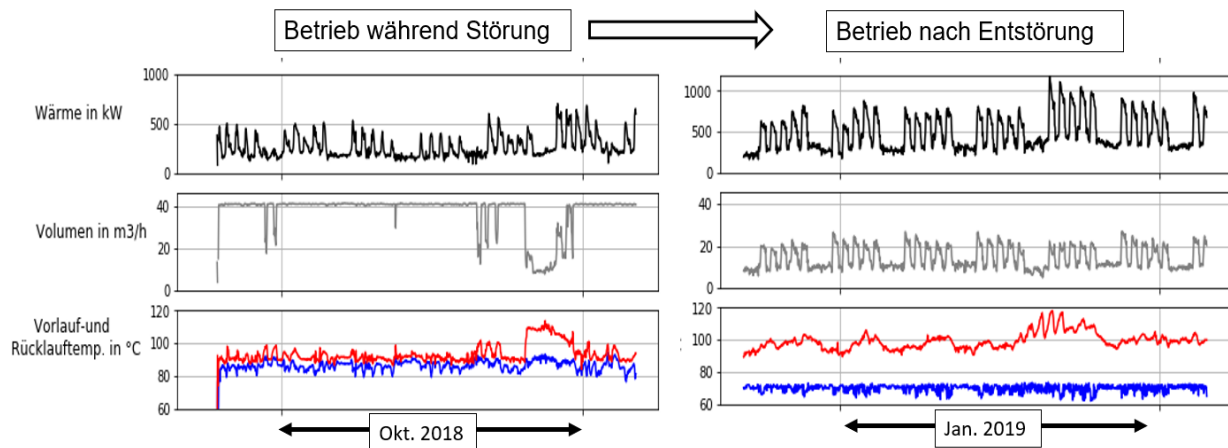
<sup>2</sup> Heimo Zinko; Hoon, Lee; Bong-Kyun Kim; Youn-Hong Kim; Håkan Lindkvist (2005): IMPROVEMENT OF OPERATIONAL TEMPERATURE DIFFERENCES IN DISTRICT HEATING SYSTEMS. Annex VII. Hg. v. IEA District Heating and Cooling.

Wärmemengenzähler ausgelesen. Bei den detektierten Fehlern wurde zwischen Einstellungsfehlern (GRÜN in Abbildung 11), Störungen (GELB) und Auslegungsfehlern (ROT) unterschieden. Die Systemebenen werden zwischen der Primärseite und der Sekundärseite unterschieden, wobei in einigen Fällen ein übergeordnetes Regelungssystem sowohl die Primär- als auch die Sekundärseite regelt.

Ranking Nr. ÜST	Wärme in MWh	dT in K	Excess-flow in m <sup>3</sup>	dT Netz-TRL in K	detektierte Fehler				
					Primärseite (STW)		Sekundärseite (Kunde)		
					ÜST	Regelung	TWW- System	Heizung	Weiteres
1	2.450	13	109.377	0,284					
2	1.981	12	108.846	0,283					
3	4.679	25	70.870	0,184					
4	630	7	66.930	0,174					
5	6.070	29	65.644	0,171					
6	4.190	28	46.839	0,122					
7	1.283	17	41.986	0,109					
8	1.457	19	38.505	0,100					
9	2.637	28	30.206	0,078					
10	1.677	25	26.100	0,068					
11	1.123	21	25.272	0,066					
12	1.130	22	22.158	0,058					
13	1.246	24	20.135	0,052					
14	1.532	28	17.603	0,046					
15	1.734	31	15.632	0,041					
16	752	24	13.197	0,034					
17	1.958	34	12.339	0,032					
18	2.027	34	12.260	0,032					
19	714	25	11.024	0,029					
20	1.688	34	10.107	0,026					
21	665	27	8.339	0,022					
22	2.666	40	5.856	0,015					
23	1.150	42	1.354	0,004					
24	842	42	974	0,003					

**Abbildung 11: Excess-Flow-Ranking der besichtigten Übergabestationen und detektierte Fehler auf Primär- und Sekundärseite**

Zu den besonders einflussreichen Fehlern gehören Störung des primären Regelventils, Einsatz einer hydraulischen Weiche und ungeregelte Hallenluftherhitzer. Die Komponenten der Primärseite sind hauptsächlich im Besitz der Städtischen Werke AG, sodass dort eine schnelle Fehlerbehebung möglich ist. Die Störungen der primären Regelventile oder Fehleinstellungen im Regler wurden bereits während des Vorhabens behoben. Dadurch konnten bei diesen Übergabestationen erhebliche Verbesserungen erreicht werden, wie anhand der Messwerte der Betriebszustände in Abbildung 12 dargestellt wird.



**Abbildung 12: Messwert-Analyse einer Übergabestation mit defektem Regelventil und nach der Fehlerbehebung mit neuem Regelventil**

Es ist zu sehen, dass der Volumenstrom nach der Entstörung durch ein neues Regelventil entsprechend des Wärmebedarfs regelt und die Rücklauftemperatur auf maximal 70 °C begrenzt. Die Rücklauftemperatur nach der Entstörung ist immer noch relativ hoch (Industriebetrieb), allerdings stellt dieser Betriebszustand bereits eine deutliche Verbesserung gegenüber dem Ausgangszustand dar. Neben der Einstellung eines verringerten Sollwertes sind weitere Maßnahmen zur Senkung der Rücklauftemperatur auf der Sekundärseite notwendig. Die meisten Fehler waren jedoch auf der Sekundärseite zu finden und liegen somit im Verantwortungsbereich der Kunden. Folglich erfordert die Behebung von Fehlern auf Sekundärseite die Mitwirkung der Kunden. Die detektierten Fehler (viele Auslegungsfehler) zeigen aber auch, dass es vielen Kunden an Know-How zur Optimierung des Anlagenbetriebs ihrer Wärmeversorgung fehlt. Hierzu bedarfs es einer Aufklärung durch den Fernwärmebetreiber. Außerdem bedarf es finanzieller Anreize (z.B. in Form tariflicher Anreizmodelle) für niedrige Rücklauftemperaturen, damit Kunden Investitionen zur Absenkung ihrer Rücklauftemperatur tätigen. Weiterhin gibt es die Option, die Einhaltung der Technischen Anschlussbedingungen (z.B. Rückbau von hydraulischen Weichen) zu erzwingen. Allerdings könnte sich dabei das Verhältnis zum Kunden verschlechtern.

### Transformationsstrategie

Die Erarbeitung einer Transformationsstrategie für ein Fernwärmesystem ist ein kontinuierlicher Prozess, der sukzessiv an veränderte Randbedingungen und methodische Möglichkeiten angepasst werden sollte.

Das erstellte Szenario zur zukünftigen Entwicklung des Wärmebedarfs zeigte, dass der Wärmebedarf der Stadt Kassel bis zum Jahr 2050 um 39 % und der Fernwärmebedarf um insgesamt 45 % sinken würden. Dadurch würde sich die Auslastung der aktuellen Wärmeerzeuger und des Wärmenetzes deutlich reduzieren. Es besteht enormer Handlungsbedarf, auch vor dem Hintergrund, dass bis 2030 hohe Ersatzinvestitionen in die bestehenden KWK-Anlagen notwendig sind. Die Erzeugerstrategie der Städtischen Werke AG sieht deshalb vor, zukünftig die KWK-Kapazitäten zu reduzieren und die Flexibilität der Erzeuger zu erhöhen, um sie unabhängiger vom Fernwärmeabsatz einsetzen zu können. Das

Müllheizkraftwerk MHKW soll die tragende Säule der Fernwärmeversorgung darstellen und könnte im Fall des erstellten Wärmerückgangsszenarios bis zu 75 % der Fernwärmeeinspeisung decken. Weitere Erzeuger würden dann weniger als 3.000 Stunden im Jahr in das Fernwärmenetz einspeisen. Weiterhin soll die energetische Verwertung von Altholz, Klärschlamm und Ersatzbrennstoffen fossile Energieträger weitgehend substituieren. Im Fall von Klärschlamm ist voraussichtlich eine kontinuierliche Verwertung notwendig, sodass die geplante Entnahmekondensationsanlage eine gewisse Flexibilität bietet und Erlöse auf dem Strommarkt generieren kann. Die Integration eines großen Wärmespeichers soll die energetische Ausnutzung und die Flexibilität weiter erhöhen.

Neben der Anpassung der Erzeuger auf den Wärmebedarfsrückgang sollte aber auch die Strategie verfolgt werden, den zukünftigen Rückgang des Fernwärmeabsatzes durch eine systematische Fernwärmekundenakquise zu kompensieren. Die Kundenakquise sollte dabei auf einer noch zu erstellenden langfristigen, spartenübergreifenden Netzstrategie für Fernwärme und Gas basieren. Für die Entwicklung dieser Netzstrategie kann der erstellte Wärmeatlas als Basis dienen. Der Wärmeatlas bietet durch die gebäudescharfe Betrachtung in Kombination mit algorithmenbasierter Analyse von Verdichtungs- und Ausbauszenarien die Grundlage für fundierte Entscheidungsfindung. Die spartenübergreifende Betrachtung ist insofern notwendig, da das Fernwärme- und Gasnetz häufig parallel liegen und ein wesentlicher Teil der Neukunden von einer Gasversorgung umstellen würde. Neben den Energieträgern Fernwärme und Gas wird in Kassel auch Heizöl zu Heizzwecken verwendet. Ein Fernwärme-Verdichtungsszenario ergab, dass im Umkreis von 40 m des Bestandsnetzes bis zu 43 GWh Heizöl pro Jahr verbraucht werden. Eine Akquise dieser potenziellen Fernwärmekunden ist vorrangig anzustreben. Der Wärmeatlas ermöglicht die Ausweisung der Adressen dieser Gebäude mit dem jeweiligen Wärmebedarf und anderen gebäudespezifischen Parametern sowie die notwendige Trassenlänge.

Für eine spartenübergreifende Netzstrategie mit dem Wärmeatlas als Planungsinstrument sind „kritische“ Netzabschnitte, Areale oder Stadtteile zu identifizieren. Wann genau ein Abschnitt als kritisch gilt, ist zum einen von den gesamtunternehmerischen Zielen abhängig und zum anderen von der Kombination der Bewertungskriterien. Beispielsweise sind parallel versorgte Straßenzüge oder Stadtteile als kritische Gebiete anzusehen. Es kann aber auch ein Areal oder ein Straßenzug als kritisch gelten, wenn über einen gewissen Zeitraum Reinvestitionen anstehen, die nicht im Verhältnis zu den erwarteten Erlösen stehen. Für die Entwicklung der Bewertungskriterien und die Abgrenzung der Abschnitte bedarf es Experten der jeweiligen Abteilungen. Die unterschiedlichen identifizierten Abschnitte könnten anschließend wie bei einem Baukasten als einzelne Bausteine zur Erfüllung der gesamtunternehmerischen Ziele herangezogen werden. Ziele sind beispielsweise die Kompensation des Fernwärmebedarfsrückgangs oder die Vermeidung von Reinvestitionen in Gasnetze durch Fernwärmeausbau.

Die Netztemperaturen beeinflussen entscheidend die Effizienz eines Fernwärmesystems. Niedrigere Netztemperaturen bieten die Möglichkeit temperatursensible Wärmeerzeuger effizient zu integrieren, die Wärmeverluste des Netzes zu verringern sowie die Stromausbeute der KWK-Anlagen zu steigern. Im Zuge der Szenarien für die Netzstrategie hat sich

herausgestellt, dass zukünftig mit niedrigeren Wärmeliniendichten von 1.500 kWh/(m·a) bis 2.000 kWh/(m·a) zu rechnen ist. Da bei diesen Wärmeliniendichten die relativen Wärmeverluste ansteigen würden, ist die Senkung von Netztemperaturen ein wesentlicher Bestandteil einer Transformationsstrategie für einen effizienten Betrieb des Fernwärmesystems. Bei dem aktuellen Wärmeerzeugerpark in Kassel wirken sich niedrigere Netztemperaturen monetär insbesondere durch die zusätzliche Stromausbeute aus. Aufbauend auf den systemseitigen Einsparungen wurden finanzielle Anreize für Kunden quantifiziert, die dem Kosten-Nutzen-Dilemma bei Investitionen zur Fehlerhebehebungen auf der Kundenseite entgegenwirken. Darauf aufbauend können entsprechende Tarifmodelle betrachtet werden. Außerdem wird empfohlen, die im Projekt entwickelte systematische Herangehensweise zur Identifizierung von ineffizienten Übergabestationen in die Arbeitsabläufe zu integrieren, um die Rücklauftemperatur der Bestandskunden mit minimalem Aufwand zu senken. Die Fehlerdetektion von Übergabestationen kann weiterhin durch einen schrittweisen Smart-Heatmeter-Rollout bzw. Fernauslesung von Wärmemengenzählern in der Fernwärme deutlich verbessert werden. Für Neukunden sollten die technischen Anschlussbedingungen auf den aktuellen Stand der Technik angepasst werden. Zusätzlich sollten Neubau- oder Konversionsgebiete auf niedrigem Temperaturniveau versorgt werden.