

Klimaneutrale Wärmeversorgung im Quartier - Konzepte im Vergleich Grundlegende Entscheidungen

Ein Beitrag aus *Modul 3 Quartiere* der
Wissenschaftlichen Begleitforschung Energiewendebauen

Sebastian Glombik, Eva Schischke, Britta Puy | Fraunhofer-Institut für Umwelt-,
Sicherheits- und Energietechnik

April 2025

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Inhalt

Zusammenfassung der Kernergebnisse.....	3
1. Hintergrund	5
2. Szenarienraum.....	6
3. Zentrale vs. Dezentrale Wärmeversorgung.....	9
4. Elektrifizierung vs. Grüne Gase.....	13
5. Einfluss der Gebäudeeffizienz	17
6. Fazit.....	21
7. Literaturverzeichnis	22

Zusammenfassung der Kernergebnisse

ALLGEMEIN

- In der Quartiersplanung muss grundlegend zwischen hohen Anfangsinvestitionen mit langfristigen Betriebseinsparungen und niedrigen Anfangsinvestitionen mit einhergehenden langfristigen wirtschaftlichen Risiken abgewogen werden. Die heutigen Rahmenbedingungen sollten deshalb die richtigen Anreize für langfristig lohnende Investitionen setzen.

ZENTRALE VS. DEZENTRALE WÄRMEVERSORGUNG

- Die Wärmebedarfsdichte ist eine geeignete Kennzahl, um ökonomisch zwischen zentraler, leitungsgebundener und dezentraler, gebäudeweiser Wärmeversorgung zu entscheiden. Bei sehr hohen oder sehr niedrigen Werten kann sie unabhängig von Dekarbonisierungsstrategie, Sanierungsstufe und Energiepreisniveau als Entscheidungsgrundlage herangezogen werden. Bei mittleren Wärmebedarfsdichten hingegen beeinflussen u.a. diese Faktoren die Entscheidung maßgeblich, sodass weiterführende Analysen empfohlen werden.
- In allen untersuchten Szenarien kann durch ein zentrales Wärmeversorgungskonzept mittels Großwärmepumpe eine höhere Eigenverbrauchsquote von lokal erzeugtem PV-Strom erzielt werden als bei dezentralen Wärmepumpen.

ELEKTRIFIZIERUNG VS. GRÜNGASSZENARIOEN

- Innerhalb des betrachteten Szenarioraums weisen die Elektrifizierungsstrategien trotz höherer Anfangsinvestitionen häufig geringere Gesamtkosten über die gesamte Nutzungsdauer auf als Dekarbonisierungsstrategien, die auf „Grüne Gase“ setzen.
- Die Grüngasszenarien weisen im Vergleich zu den Strategien mit Fokus auf Elektrifizierung über alle Quartierstypen hinweg eine deutlich höhere Unsicherheit in der Gesamtkostenverteilung auf. Insbesondere sind die Maximalwerte der Gesamtkosten für Grüngassszenarien durchweg deutlich höher.
- Aus Sicht des Endenergiebedarfs im Quartiersbilanzraum ist die Dekarbonisierungsstrategie Elektrifizierung klar zu bevorzugen. Unter Berücksichtigung eines zukünftigen grünen Strommixes, sowie potenzieller lokaler Erzeugung und Nutzung von Erneuerbarer Energie, sind die Elektrifizierungsszenarien als ökologisch deutlich vorteilhafter zu bewerten.

EINFLUSS DER GEBÄUDESANIERUNG

- Je höher der Gebäudeeffizienzstandard, desto robuster zeigen sich die Gesamtkosten eines Versorgungskonzeptes gegenüber Energiepreisschwankungen.
- In der Quartiersplanung sollten die langfristigen Entwicklungen des Sanierungsniveaus berücksichtigt werden, da diese die wirtschaftliche Vorteilhaftigkeit eines Konzeptes in Abhängigkeit des Quartierstyps verändern können. Gerade in der Wärmenetzplanung sollte die langfristige Entwicklung der Wärmeabnahme entsprechend mitberücksichtigt werden.

1. Hintergrund

Für die Energiewende können energetische Quartierslösungen einen wichtigen Beitrag leisten, da sie die Potenziale und Lösungsansätze direkt vor Ort nutzen und somit für die relevanten lokalen Akteure unmittelbar erfahrbar und umsetzbar sind. Im Rahmen der wissenschaftlichen Begleitforschung "Energiewendebauen – Modul 3 Quartiere" wurden Erkenntnisse aus einer Vielzahl von geförderten Quartiersforschungsprojekten zusammengetragen, die durch Fragebögen, Interviews oder über unterschiedliche Workshopformate erhoben worden sind. Ergänzend zu diesen Arbeiten wurden übergeordnete modellbasierte Untersuchungen von Typquartieren durchgeführt. Während bei den Forschungsprojekten häufig die Umsetzung eines Versorgungskonzeptes für einen bestimmten Standort im Fokus steht, sollen die folgenden Auswertungen grundlegende Zusammenhänge aufzeigen, die für die Planung von Quartierslösungen relevant sind.

Dieses Papier stellt die erste Veröffentlichung einer Reihe von Untersuchungen eines breiten Szenarienraums für zukünftige Quartierslösungen dar. Ziel des definierten Szenarienraums ist eine Orientierung für Entscheidungen für die energetische Quartiersplanung zu schaffen. Angelehnt an die BMWK T45-Langfristszenarien¹, welche Transformationsstrategien für das gesamte bundesweite Energiesystem umfassen, wird ein entsprechend vereinfachter Szenarienraum für die lokale Quartiersplanung definiert. Eine genaue Darstellung aller getroffenen Annahmen zur Definition des Szenarienraums und der verwendeten Modellansätze ist in einer gesonderten Publikation vorhanden (Glombik et al., 2025). In dieser Veröffentlichung wird eine erste globale Analyse des entstandenen Ergebnisdatensatzes der insgesamt 216 betrachteten Quartiersversorgungsszenarien vorgestellt. Die Auswertungspunkte umfassen dabei Fokusthemen, denen im Rahmen von Projektworkshops wiederholt eine hohe Relevanz zugeschrieben wurde. Die Fokusthemen im Rahmen dieser Veröffentlichung umfassen die Auswertung hinsichtlich der Themen *zentrale vs. dezentrale Wärmeversorgung*, *Elektrifizierung vs. Grüngasszenarien* und *Einfluss der Gebäudeeffizienz*. Diese Veröffentlichung fokussiert sich dabei auf die Auswertungsergebnisse des Gesamtdatensatzes des Szenarienraums. Tiefergehender Analysen von Teilergebnissen mit Blick auf die Wirtschaftlichkeit von Versorgungslösungen, sowie zu den sozio-ökonomischen Folgewirkungen auf beteiligte Akteur*innen werden in der aufbauenden Veröffentlichungen von Bergmann (2025) durchgeführt.

Dieser Beitrag ist wie folgt strukturiert: Zunächst wird der definierte Szenarienraum zusammengefasst dargestellt. Anschließend wird in Kapitel 3 die Auswertung des Szenarienraums im Hinblick auf den Vergleich der dezentralen und zentralen Versorgungskonzepte vorgestellt. In Kapitel 4 folgt eine Einordnung der Szenarien basierend auf eine rein elektrifizierte und auf grüne Gase basierte Dekarbonisierungsstrategie. Im Anschluss wird in Kapitel 5 der Einfluss der Gebäudeeffizienz auf die Bewertung der Quartierslösungen untersucht.

¹ Siehe www.langfristszenarien.de – Diese Arbeit bezieht sich auf den breiten Szenarienraum der T45-Szenarien aus dem Jahr 2022.

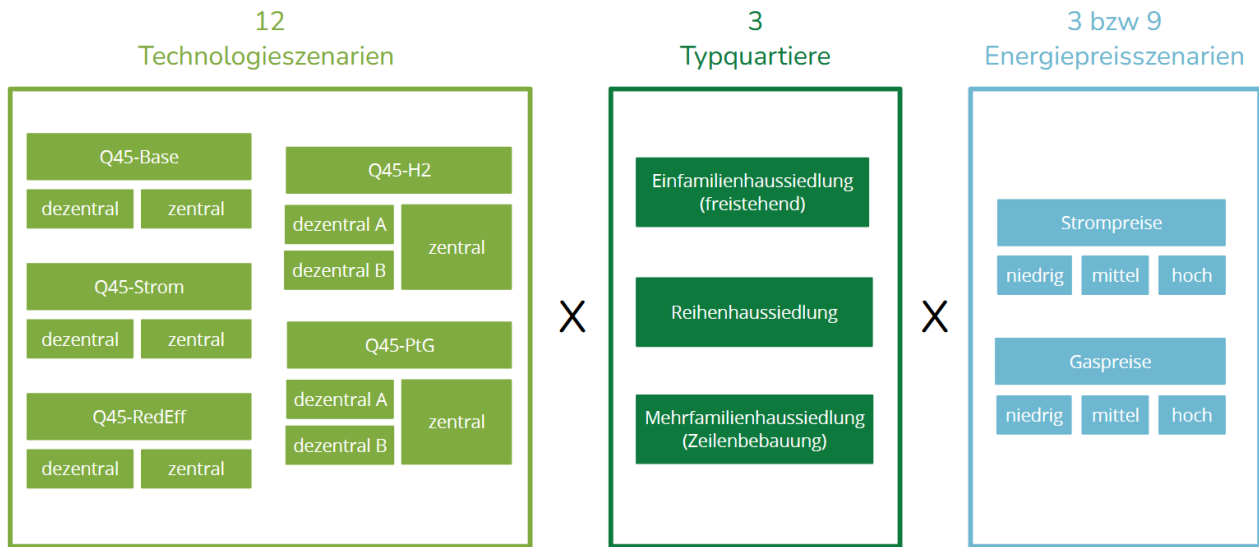
2. Szenarienraum

Hier folgt eine kurze Darstellung des betrachteten Szenarienraums zukünftiger energetischer Quartiersversorgungskonzepte. Eine Herleitung und detaillierte Dokumentation aller getroffenen Annahmen wird durch Glombik et al. (2025) bereitgestellt.

Eine Übersicht des Szenarienraums ist in Abbildung 1 dargestellt. Der Szenarienraum umfasst 12 unterschiedliche Technologieszenarien für die Energieversorgung von insgesamt 3 Typquartieren unter Betrachtung von 3 bzw. 9 Energiepreisszenarien. Die Technologieszenarien sind angelehnt an die Ergebnisse der BMWK T45-Langfristszenarien für die Verteilung der Heiztechnologien des deutschen Gebäudebestands (Mellwig & Blömer, 2022). Die Technologieauswahl in den jeweiligen Technologieszenarien ist in Abbildung 2 dargestellt. Die drei Typquartiere stellen unterschiedliche Siedlungstypologien für Wohnquartiere dar, die vor allem durch ihre unterschiedliche Wärmebedarfsdichte charakterisiert sind (siehe Tabelle 1 und Abbildung 3). Die Energiepreisszenarien bilden die langfristigen Unsicherheiten in der Entwicklung der Energiekosten ab. Dazu werden jeweils drei Preisniveaus für die Endenergieträger Strom und Gas definiert.

Insgesamt ergeben sich 216 Energieversorgungsszenarien, die im Rahmen dieser Auswertung miteinander verglichen werden. Der Ergebnisdatensatz aus den Modellrechnungen umfasst dabei eine Vielzahl von KPIs für die Bewertung der Wirtschaftlichkeit und energetische Effizienz der jeweiligen Versorgungsszenarien. Diese Arbeit fokussiert sich auf die Analyse der Schwerpunkte *zentrale vs. dezentrale Wärmeversorgung*, *Elektrifizierung vs. Grüngasszenarien* und *Einfluss der Gebäudeeffizienz*. Der Ergebnisdatensatz bietet jedoch weiterführende Auswertungsmöglichkeiten und kann bei Bedarf zur Verfügung gestellt werden.

Klimaneutrale Wärmeversorgung im Quartier: Grundlegende Entscheidungen



= 216 Energieversorgungsszenarien

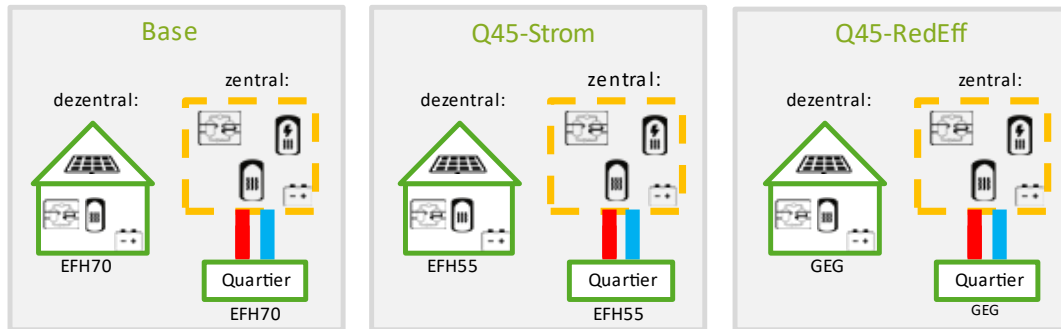
Abbildung 1: Überblick über den Szenarienraum bestehend aus Technologieszenarien, Typquartieren und Energiepreisszenarien. Eine ausführliche Beschreibung und Herleitung findet sich in Glombik et al. (2025).

Tabelle 1: Daten der definierten Typquartiere (Auszug aus Glombik et al. (2025))

	Einfamilienhaussiedlung	Reihenhaussiedlung	Mehrfamilienhaussiedlung
TABULA-Typgebäude	DE.N.SFH.08.Gen	DE.N.TH.03.Gen	DE.N.MFH.05.Gen
Baujahr	1990	1930	1960
Anzahl Gebäude	39	39	13
Anzahl Wohneinheiten (Quartier)	39	39	416
Spezifischer Wärmebedarf (GEG-Sanierungsstufe)	92,3 kWh/m ² *a	77 kWh/m ² *a	75 kWh kWh/m ² *a
Trassenlänge Wärmenetz	975 m	214,5 m	325 m
Wärmebedarfsdichte (GEG-Sanierungsstufe)	0,55 MWh/m*a	1,58 MWh/m*a	9,41 MWh/m*a

Klimaneutrale Wärmeversorgung im Quartier: Grundlegende Entscheidungen

Elektrifizierungsszenarien



Grüngassszenarien

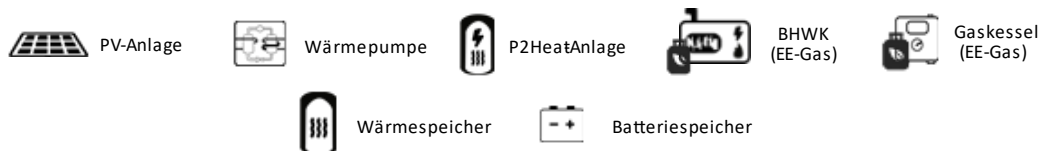
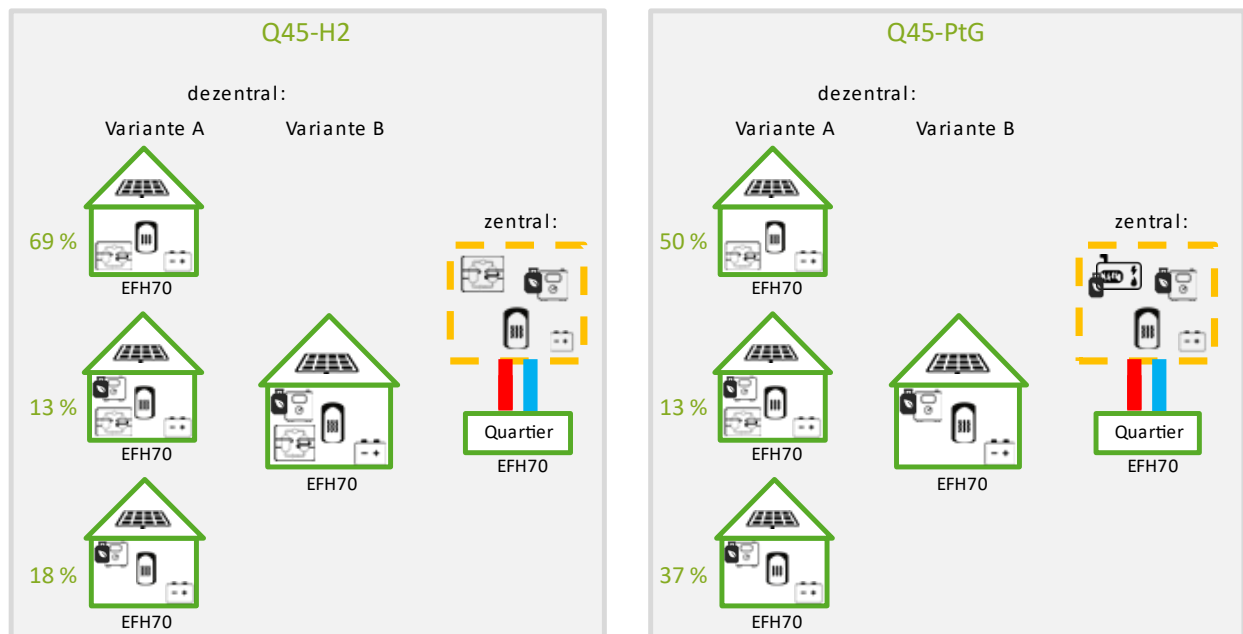


Abbildung 2: Detaildarstellung der Technologieszenarien. Die Elektrifizierungsszenarien sind charakterisiert durch Strom als Endenergieträger und unterscheiden sich im Sanierungsniveau der Gebäude. Die Grüngassszenarien berücksichtigen darüber hinaus Erneuerbare Gase als Endenergieträger. Für die dezentrale Versorgung der Grüngassszenarien werden jeweils zwei Varianten betrachtet: 100% Versorgung entsprechend dem Szenario oder anteilige Verteilung der Technologien auf die Gebäude entsprechend der Verteilung in den zugehörigen T45 Langfristszenarien.

3. Zentrale vs. Dezentrale Wärmeversorgung

Die Entscheidung zwischen zentraler, leitungsgebundener Wärmeversorgung und dezentraler, gebäudeweiser Wärmeversorgung stellt einen zentralen Aspekt bei der Planung von Quartiersenergiesystemen dar. Neben weichen Einflussfaktoren, wie der Bereitschaft und Möglichkeit zur Investition, Umsetzungswille, sowie technischen Einflussfaktoren, wie der Verfügbarkeit einer zentralen Wärmequelle, spielen insbesondere die Systemkosten eine entscheidende Rolle bei dieser Wahl. Die Gesamtkosten des Systems aus der Perspektive eines zentralen Planers setzen sich aus den Investitionen in Erzeugungsanlagen und den Betriebskosten der Anlagen zusammen. Bei der zentralen, leitungsgebundenen Wärmeversorgung fallen zusätzliche Kosten für die Installation und den Betrieb des Wärmenetzes an. Die zentrale Wärmeversorgung ist wirtschaftlich dann attraktiv, wenn die Einsparungen bei den Investitions- und Betriebskosten der Erzeugungsanlagen durch den zentralen Betrieb die zusätzlichen Kosten für das Wärmenetz mindestens ausgleichen.

Je größer die abgenommene Wärmemenge pro Leitungsmeter, desto geringer ist der Anteil der Zusatzinvestitionen, der durch Kosteneinsparungen ausgeglichen werden muss. Daher wird diese Kennzahl der Wärmebedarfsdichte bzw. Wärmelinien-dichte häufig als ökonomisches Entscheidungskriterium für die Wahl zwischen leitungsgebundener und dezentraler Wärmeversorgung verwendet. Abbildung 3 zeigt die Wärmebedarfsdichten der untersuchten Typquartiere unter Annahme unterschiedlicher Sanierungsstände Gebäude im Quartier.

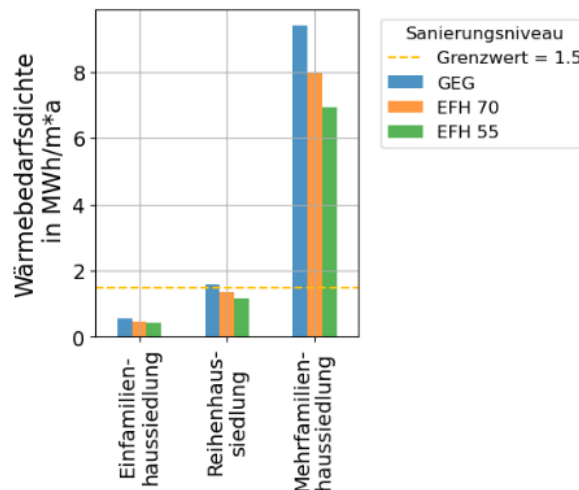


Abbildung 3: Wärmebedarfsdichten, für die im Rahmen des Szenarienraums betrachteten Typquartiere für verschiedene Sanierungsstufen. Typische Grenzwerte der Wärmebedarfsdichte in der Literatur (bspw. (C.A.R.M.E.N. e.V.)) für die Entscheidung für ein Wärmenetz liegen bei um die 1,5 MWh/m²*a

Die Analyse der Energieversorgungskonzepte ist in Abbildung 4 dargestellt. Sie zeigt, dass im Typquartier *Einfamilienhäuser*, dessen Wärmebedarfsdichte unter dem in der Literatur angegebenen typischen Grenzwert von 1,5 MWh/m²*a liegen, zentrale Wärmeversorgungskonzepte zu höheren Gesamtkosten führen als

Klimaneutrale Wärmeversorgung im Quartier: Grundlegende Entscheidungen

dezentrale Systeme. Dies gilt für alle Dekarbonisierungsstrategien und Sanierungsstufen. Daher lässt sich die Mehrinvestition in das Wärmenetz mit keiner Technologiekombination wirtschaftlich sinnvoll kompensieren. Im Gegensatz dazu ist im Typquartier *Mehrfamilienhäuser*, dessen Wärmebedarfsdichten deutlich über dem Grenzwert liegt, die zentrale Wärmeversorgung kostengünstiger als die dezentrale Variante. Für das Typquartier *Reihenhäuser* mit Wärmebedarfsdichten genau im Bereich des Grenzwertes sind die Unterschiede in den Gesamtkosten für beide Varianten zentral und dezentral deutlich geringer.

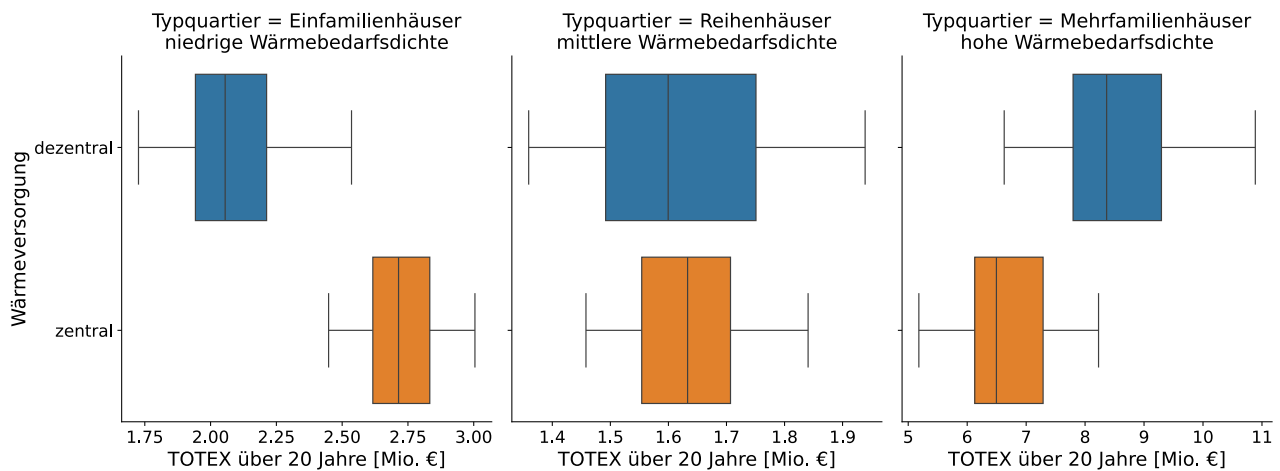


Abbildung 4: Verteilung der Gesamtkosten (TOTEX) gegenübergestellt für zentrale und dezentrale Wärmeversorgungskonzepte für alle betrachteten Szenarien. Die Gesamtkosten sind definiert als die Summe der Investitionskosten (CAPEX) in alle Technologien (+ Wärmenetz) zzgl. laufenden Kosten für einen angenommenen Betriebszeitraum über 20 Jahre. In den Investitionskosten sind hierbei Förderungen sowie Kosten für die Sanierung nicht berücksichtigt.

Im Rahmen der Analyse wurde weitergehend untersucht, wie sensitiv diese Aussagen bzgl. des Strom- und Gaspreisniveaus sind. Für die Typquartiere *Einfamilienhäuser* und *Mehrfamilienhäuser* führen Variationen im Strom- und Gaspreis zwar zu Veränderungen in den Gesamtkosten, die Vorteilhaftigkeit der dezentralen (Typquartier *Einfamilienhäuser*) bzw. der zentralen Lösung (Typquartier *Mehrfamilienhäuser*) bleibt allerdings bestehen, weshalb für diese von robusten Lösungen hinsichtlich der Energiepreise gesprochen werden kann. Für das Typquartier *Reihenhäuser* zeigt sich hingegen ein entscheidender Einfluss (siehe Abbildung 5). Bei hohen Strompreisen ist die zentrale Wärmeversorgung kostengünstiger. Bei mittleren und niedrigen Strompreisen ist die dezentrale Wärmeversorgung tendenziell günstiger. Grundlegend gilt: Wenn die Investitionskosten in die Erzeugungsanlagen und Rohrleitungen gleichbleibt, steigen die Betriebskosten mit steigendem Strompreis. Demnach ist bei Systemen mit höherer Effizienz und entsprechend niedrigen Endenergiebedarfen mit einer geringeren Steigerung der Betriebskosten im Vergleich zum ineffizienteren System zu rechnen.

Allerdings besitzen die zentralen Wärmepumpen gegenüber den dezentralen Wärmepumpen im Rahmen der Annahmen dieser Studie keinen signifikanten Effizienzvorteil. Im Gegenteil: Die zentralen Wärmepumpen haben einen höheren Strombedarf als im dezentralen Versorgungsfall, da diese die zusätzlichen Verluste der

Klimaneutrale Wärmeversorgung im Quartier: Grundlegende Entscheidungen

Wärmenetzes decken müssen. Die Vorteilhaftigkeit der zentralen Wärmeversorgungslösung in den Ergebnissen für das hohe Strompreisniveau resultiert aus dem erhöhten Eigenverbrauch des im Quartier erzeugten PV-Stroms. Bei steigendem Eigenverbrauch des lokal im Quartier erzeugten PV-Stroms sinkt der Anteil des aus dem Stromnetz importierten Stroms und somit die Abhängigkeit von den Strombezugskosten. Mit steigendem Strompreis kann das Flexibilitätspotential des zentralen Wärmespeichers zu einem wirtschaftlicheren Betrieb der zentralen Wärmepumpe führen. In den dezentralen Versorgungslösungen ist der Steigerung des PV-Eigenverbrauchs durch die dezentralen Wärmespeicherkapazitäten beschränkter und zudem nicht auf das Gesamtquartier hin optimiert. Bei einem niedrigeren Strompreisniveau sinkt hingegen der Vorteil eines höheren Stromeigenverbrauchs, sodass hier die dezentrale Wärmeversorgung durch die geringeren Endenergiebedarfe vorteilhafter wird.

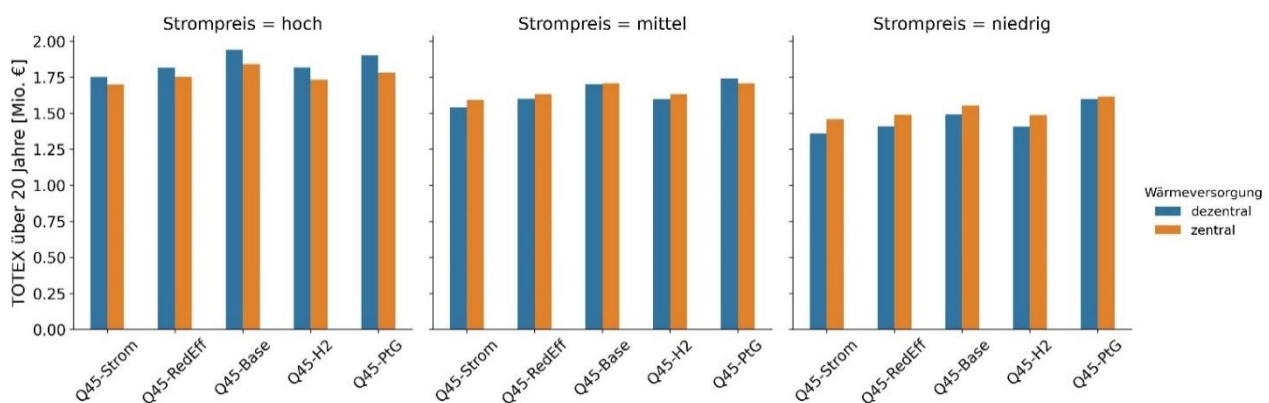


Abbildung 5: Sensitivität der Gesamtkosten für zentrale vs. dezentrale Konzepte bzgl. des Strompreisniveaus für das Typquartier Reihenhäuser. Für die Grüngasszenarien Q45-H2 und Q45-PtG sind hier die Gesamtkosten für das Gaspreisniveau mittel dargestellt.

Der Eigenverbrauch des lokal erzeugten PV-Stroms für die verschiedenen Versorgungsvarianten ist in Abbildung 6 in Form der Eigenverbrauchsquote dargestellt. Diese beschreibt den Anteil lokal erzeugter Energie, der vor Ort im Quartier verbraucht wird. Diese Kennzahl zeigt signifikante Unterschiede zwischen zentralen, leitungsgebundenen und dezentralen, gebäudeweisen Wärmeversorgungssystemen. Es wird deutlich, dass in Quartieren mit geringeren und mittleren Wärmebedarfsdichten zentral eine höhere Eigenverbrauchsquote als bei dezentralen Versorgungskonzepten erzielt werden kann. Im Typquartier Mehrfamilienhäuser wird ebenfalls eine höhere Eigenverbrauchsquote in der zentralen Versorgungsvariante erreicht, jedoch ist der Unterschied zur dezentralen Lösung nur geringfügig. Dies ist darauf zurückzuführen, dass durch die zentrale Versorgung die Gleichzeitigkeit von erzeugtem PV-Strom und dem Strom- bzw. Wärmebedarf erhöht wird. In Mehrfamilienhäusern ist diese Gleichzeitigkeit bereits innerhalb der Gebäude deutlich ausgeprägt, da sich hier die Stromlastprofile aller Wohneinheiten bereits auf Gebäudeebene überlagern. Die besonders hohe Eigenverbrauchsquote der Reihenhaussiedlung kann durch die kleinen Dachflächen im Verhältnis zu den Nutzenergiebedarfen erklärt werden. Hierdurch folgt ein deutlich geringerer Stromüberschuss als durch die großen Dachflächen der Einfamilienhäuser, der entsprechend zu einem höheren Anteil in der Energiezentrale zur Deckung der Strombedarfe der zentralen Wärmepumpen genutzt werden kann.

Klimaneutrale Wärmeversorgung im Quartier: Grundlegende Entscheidungen

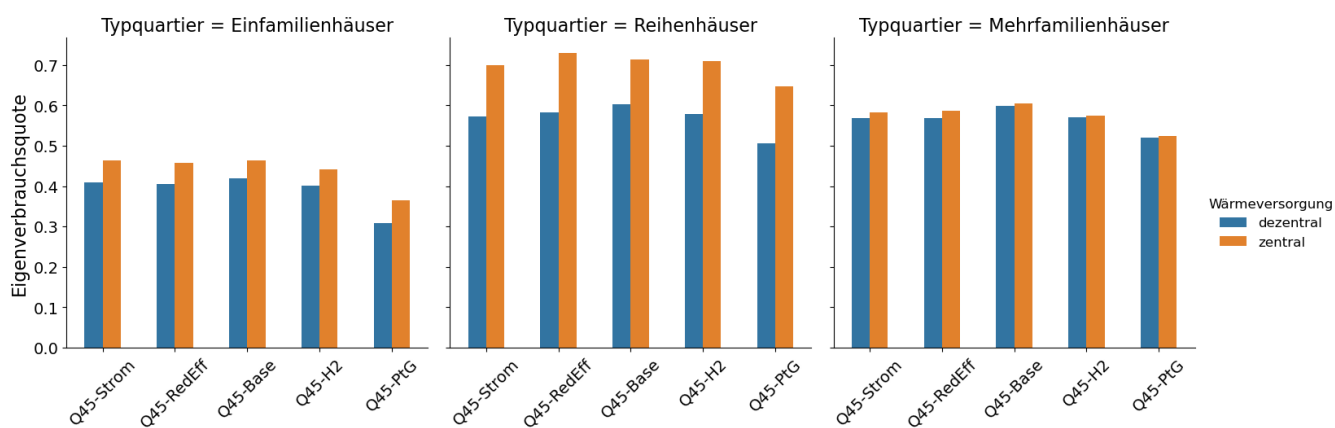


Abbildung 6: Die Eigennutzungsquote zeigt den Anteil an lokal erzeugtem PV-Strom, welcher im Quartier direkt oder zur Wärmeversorgung genutzt wird.

4. Elektrifizierung vs. Grüne Gase

Eine weitere wesentliche Fragestellung in der Planung zukünftiger energetischer Quartiersversorgungskonzepte liegt in der Rolle grüner Gase zur Deckung von Wärmebedarfen. Als grüne Gase werden hier gasförmige Brennstoffe oder Energieträger bezeichnet, die aus nachhaltigen, erneuerbaren Quellen (in der Regel EE-Strom) stammen und klimaneutral oder zumindest deutlich CO₂-reduzierend gegenüber den fossilen Alternativen wirken. Beispiele sind Biogas bzw. -methan oder grüner Wasserstoff. Im Rahmen der nachfolgend dargestellten Auswertungen wird der gesamte Szenarienraum in zwei Technologiegruppen unterteilt: Die Gruppen *Elektrifizierung* und *Grüne Gase*. Die Gruppe *Elektrifizierung* beinhaltet alle Technologieszenarien, welche allein auf Strom als Endenergieträger und Wärmepumpen als Kerntechnologie setzen (Q45-Base, Q45-RedEff, Q45-Strom). Die Gruppe *Grüne Gase* besteht aus den Technologieszenarien, welche auf grüne Gase als Endenergieträger setzen, die entweder nur für einen Spitzenlastkessel (Q45-H2) oder vollständig für die Deckung der Wärmebedarfe über Gaskessel bzw. BHWKs eingesetzt werden (Q45-PtG).

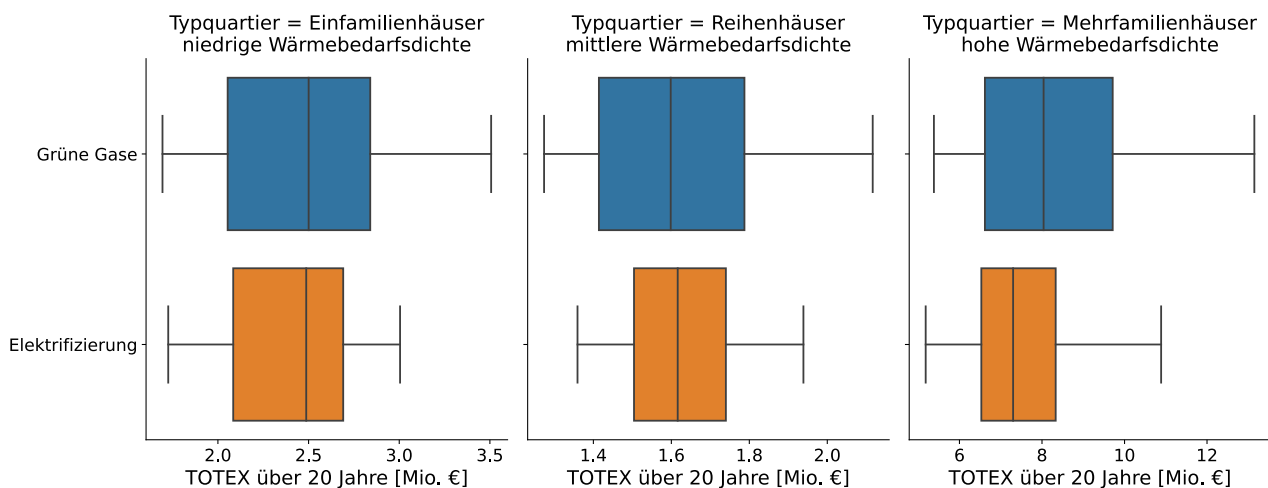


Abbildung 7: Verteilung der Gesamtkosten (TOTEX) gegenübergestellt für die Gruppen der Versorgungsszenarien Elektrifizierung und Grüne Gase. Die Gesamtkosten sind definiert als die Summe der Investitionskosten (CAPEX) in alle Technologien (+ Wärmenetz) zzgl. der laufenden Kosten für einen angenommenen Betriebszeitraum über 20 Jahre. In den Investitionskosten sind hierbei Förderungen sowie Kosten für die Sanierung nicht berücksichtigt.

In Abbildung 7 ist die Verteilung der Gesamtkosten während der Nutzungsdauer von 20 Jahren der jeweiligen energetischen Quartierskonzepte für die drei betrachteten Typquartiere dargestellt. Dabei werden die Verteilungen der Gesamtkosten von rein elektrifizierten Konzepten (unten) und Konzepten, die auf einer Versorgung mit grünen Gasen basieren (oben), gegenübergestellt. Insgesamt zeigen die Konzepte, die grüne Gase berücksichtigen, über alle Quartierstypen hinweg eine deutlich höhere Unsicherheit in der Gesamtkostenverteilung innerhalb des definierten Szenarienraums, während sich die elektrifizierten Szenarien wirt-

Klimaneutrale Wärmeversorgung im Quartier: Grundlegende Entscheidungen

schaftlich robuster Verhalten. Die elektrifizierten Konzepte weisen tendenziell häufiger niedrigere oder vergleichbare Gesamtkosten im Vergleich zu den Grüngasszenarien auf. Bei den Maximalwerten der Gesamtkosten liegen die Grüngasszenarien hingegen durchweg höher. Ein wesentlicher Faktor für diese Unterschiede ist die Streuung der Betriebskosten innerhalb der Preissensitivitäten. Insbesondere die Grüngasszenarien, die auf einen vollständigen Fuel-Switch setzen (Q45-PtG), zeigen eine starke Abhängigkeit von dem angenommenen Energiepreisniveau.

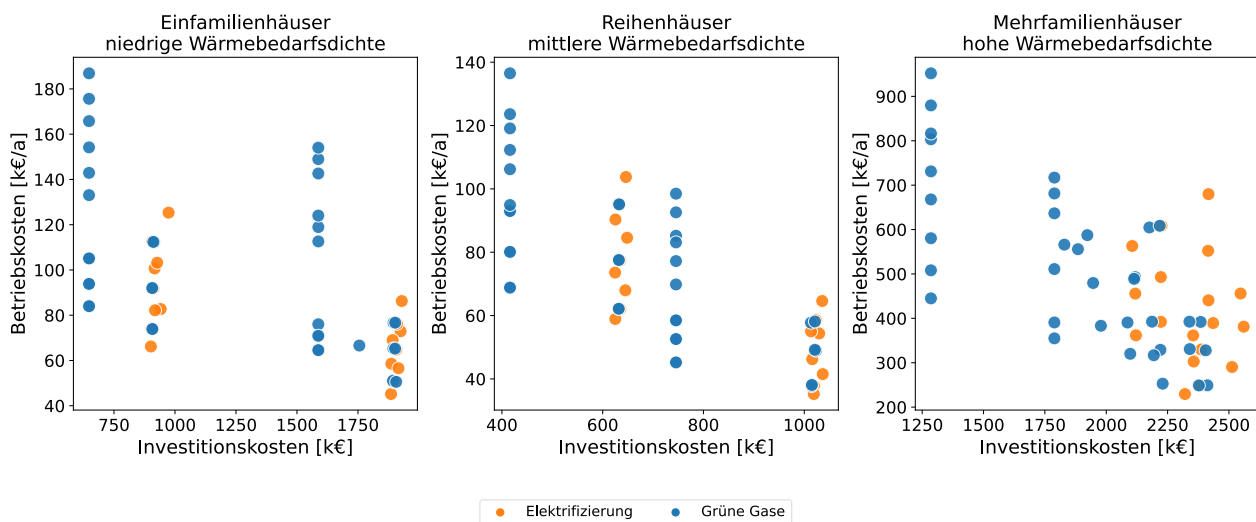


Abbildung 8: Gegenüberstellung der Investitions- und Betriebskosten der Energieversorgungsszenarien der jeweiligen Typquartiere. Jeder Punkt entspricht einem Versorgungsszenario, welches durch eine bestimmte Technologiekombination und einem Energiepreisszenario definiert ist.

Dies wird in Abbildung 8 verdeutlicht, in der die Betriebskosten über die Investitionskosten aufgetragen sind. Das Punktecluster mit sehr niedrigen Investitionskosten jeweils ganz links und einer breiten Streuung der Betriebskosten repräsentiert das Q45-PtG Szenario einer dezentralen Wärmeversorgung durch Gaskessel, die mit grünen Gasen betrieben werden. Den niedrigen Investitionskosten stehen entsprechend potenziell sehr hohe Betriebskosten gegenüber, welche zu langfristig höheren Gesamtkosten führen können als bei Konzepten, die deutlich höhere Investitionsaufwände erfordern. Grundlegend ist hier ersichtlich, dass Konzepte mit hohen Investitionen mit eher geringeren Betriebskosten einhergehen. Dies verdeutlicht, dass in der Quartiersplanung zwischen hohen Anfangsinvestitionen mit langfristigen Betriebseinsparungen und niedrigen Investitionen mit einhergehenden hohen langfristigen wirtschaftlichen Risiken abgewogen werden muss.

Der Vergleich der jeweiligen Gesamtkostenverteilungen (siehe Abbildung 7) zeigt zudem eine signifikante Abhängigkeit von dem jeweiligen Quartierstyp. Während die Verteilungen der *Reihenhaus-* und *Einfamilienhaussiedlungen* um den gleichen Medianwert streuen, verdeutlichen die Extremwerte, dass das Elektrifizierungsszenario in der *Einfamilienhaussiedlung* gegenüber den Grüngasszenarien wirtschaftlich vorteilhafter

Klimaneutrale Wärmeversorgung im Quartier: Grundlegende Entscheidungen

ist. In der Reihenhaussiedlung hingegen stellen die Grüngasszenarien sowohl die teuersten als auch die günstigsten Versorgungsvarianten im gesamten Szenarienraum dar. Dieser Effekt ist in den Annahmen der Energiepreinsniveaus begründet. So fällt die angenommene Gesamtschwankung des Gaspreises höher aus als die Schwankung des Strompreises, was die grundlegendere höhere Unsicherheit bzgl. der Kostenentwicklungen von grünen Gasen abbildet. Ein klareres Ergebnis zeigt sich bei der Mehrfamilienhaussiedlung: Hier überwiegt die Anzahl der Elektrifizierungsszenarien mit niedrigeren Gesamtkosten deutlich gegenüber den Grüngasszenarien.

Der Einfluss des Quartierstyps auf die Gesamtkostenverteilung der jeweiligen Dekarbonisierungsstrategie lässt sich unter anderem durch Skaleneffekte bei den Investitionskosten der Wärmepumpen in den Elektrifizierungsszenarien und durch die jeweils zu deckenden Raumwärmebedarfe erklären. Grundlegend gilt hierbei:

1. Je größer eine Wärmepumpe, desto kleiner werden in der Tendenz ihre leistungsspezifischen Kosten (Investitionskosten pro kW Heizleistung).
2. Je höher der Heizenergiebedarf bei gegebener Heizleistung und einem für Wärmepumpen günstigen Strom-Gas-Preisverhältnis ist, desto vorteilhafter ist die Wärmepumpe im Vergleich zum Gaskessel.

Besonders ausgeprägt sind diese Effekte (Punkt 1 und 2) bei der Mehrfamilienhaussiedlung. Die hier vorhandenen sehr hohen Wärmebedarfe führen zu höheren absoluten Wärmepumpenleistungen im Vergleich zu den beiden anderen Typquartieren, was wiederum zu reduzierten leistungsspezifischen Kosten führt (Punkt 1). Gleichzeitig wirkt sich durch den hohen Wärmebedarf ein für die Wärmepumpe günstiges Verhältnis aus Strom- und Gaspreis noch viel signifikanter aus als bei den anderen Typquartieren (Punkt 2), sodass hier ein großes Kosteneinsparpotential im Rahmen der betrachteten Szenarien gegen ist. Dies erklärt die deutlich erkennbare Vorteilhaftigkeit der Elektrifizierungsszenarien gegenüber den Grüngasszenarien in Abbildung 7. In der Einfamilienhaus- und Reihenhaussiedlung ist das Verhältnis zwischen den zu deckenden Raumwärmebedarfen und der installierten Wärmepumpenleistung hingegen nahezu identisch (Punkt 2). Allerdings benötigen die betrachteten Einfamilienhäuser fast doppelt so hohe Wärmepumpenleistungen. Dadurch sind die leistungsspezifischen Anschaffungskosten der Wärmepumpe bei den Einfamilienhäusern günstiger (Punkt 1). Dies führt dazu, dass in der Einfamilienhaussiedlung mittels einer Wärmepumpe tendenziell geringere Kosten gegenüber einem Gaskessel erzielt werden als in der Reihenhaussiedlung. Dieser Effekt (Punkt 1) zeigt sich bei der Investition in einen Gaskessel nicht in gleicher Weise, da die Gaskesselinvestitionen eine deutlich geringere Abhängigkeit von der Heizleistung aufweisen als die Investitionen in Wärmepumpen.

Neben der reinen Kostenbetrachtung ist jedoch auch die energetische Effizienz der beiden Versorgungsszenarien zu bewerten. Aus lokaler Perspektive des Quartiers sind in Abbildung 9 die jeweilige Verteilung der gesamten Endenergiebedarfe aufgezeigt, welche sich aus der Summe des bezogenen Gases und/oder Stroms

Klimaneutrale Wärmeversorgung im Quartier: Grundlegende Entscheidungen

in MWh zusammensetzen. Die Verteilungen der Gesamtendenergiebedarfe der Elektrifizierungs- und Grün-gasversorgungsszenarien zeigen ein ähnliches Bild über alle Quartierstypen hinweg. Es ergeben sich zwei Hauptcluster mit niedrigen und sehr hohen Endenergiebedarfen. Im Cluster der niedrigen gEndenergiebedarfe sind alle Elektrifizierungsszenarien zu finden, sowie die Grün-gasszenarien, die auf einen Spitzenlastkessel mit erneuerbaren Gasen setzen. Das Cluster mit den hohen Endenergiebedarfen zeigt die Szenarien mit einem vollständigen Fuel-Switch ohne Einsatz von Wärmepumpentechnologien auf (Q45-PtG). Unter Berücksichtigung eines steigenden Anteils an Erneuerbaren Energien im Strommix und einer potentiellen lokalen Erzeugung ist der Betrieb der Versorgungskonzepte, die auf eine Wärmepumpe als Kerntechnologie zur Wärmeversorgung setzen, eindeutig als ressourceneffizienter zu bewerten.

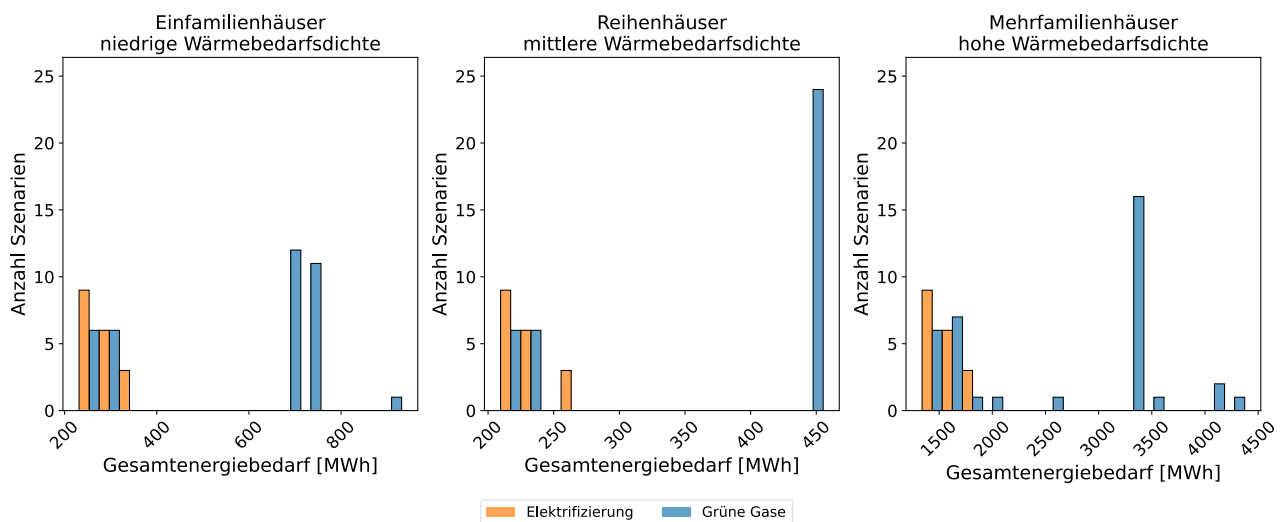


Abbildung 9: Verteilung der Höhe des Endenergiebedarfs der jeweiligen Versorgungsszenarien in den Gruppen Elektrifizierung und Grüne Gase

5. Einfluss der Gebäudeeffizienz

Bei der Transformation von Bestandsquartieren spielt die Gebäudeeffizienz eine wichtige Rolle. Eine besondere Herausforderung ist dabei, dass unterschiedliche Akteure für die Investitionen in das Energieversorgungskonzept und die Gebäudeeffizienz verantwortlich sein können. Im Rahmen der vorliegenden globalen Szenarienauswertung liegt der Schwerpunkt auf der Untersuchung des Einflusses eines vorgegebenen Effizienzstandards der Gebäude auf die verschiedenen Versorgungskonzepte. Eine Analyse zu den sozioökonomischen Folgewirkungen unter Berücksichtigung der verschiedenen Perspektiven unterschiedlicher Akteur*innen erfolgt in einer gesonderten Veröffentlichung von Bergmann (2025).

Dazu wird der Einfluss von drei verschiedenen Sanierungsstufen (GEG, EFH70, EFH55) auf die Bewertung der Energieversorgungskonzepte betrachtet. Dieser Einfluss wird ausschließlich für die Elektrifizierungsszenarien untersucht, da für die Grüngasszenarien – in Anlehnung an die T45-Szenarien – von einem konstanten Sanierungsniveau ausgegangen wird. Die gewählten Sanierungsstandards orientieren sich ebenfalls an den Annahmen der T45-Szenarien. Die Gesamtkosten der Quartierskonzepte beinhalten keine Investitionskosten für die Gebäudesanierung, da der Fokus der globalen Auswertung auf den Versorgungskonzepten liegt. Der Einfluss der Sanierungskosten wird in Bergmann (2025) untersucht.

Abbildung 10 zeigt den Einfluss der Sanierungsstufe auf den Endenergiebedarf der Quartiersversorgungskonzepte für jedes Typquartier. Es wird deutlich, dass der Endenergiebedarf in allen Szenarien mit steigender Sanierungsstufe erwartungsgemäß grundsätzlich sinkt. Der Effekt ist bei den Einfamilienhaussiedlungen und Mehrfamilienhäusern am größten, mit einer Reduzierung von jeweils 20 % bzw. 18 % im Vergleich zum GEG auf das EFH-55-Niveau. Etwas geringer fällt der Einfluss bei den Reihenhäusern aus, mit nur etwa 14 % Reduzierung, da ein kleinerer Anteil der Gebäudehülle bezogen auf das beheizte Raumvolumen der Außenluft ausgesetzt ist.

Klimaneutrale Wärmeversorgung im Quartier: Grundlegende Entscheidungen

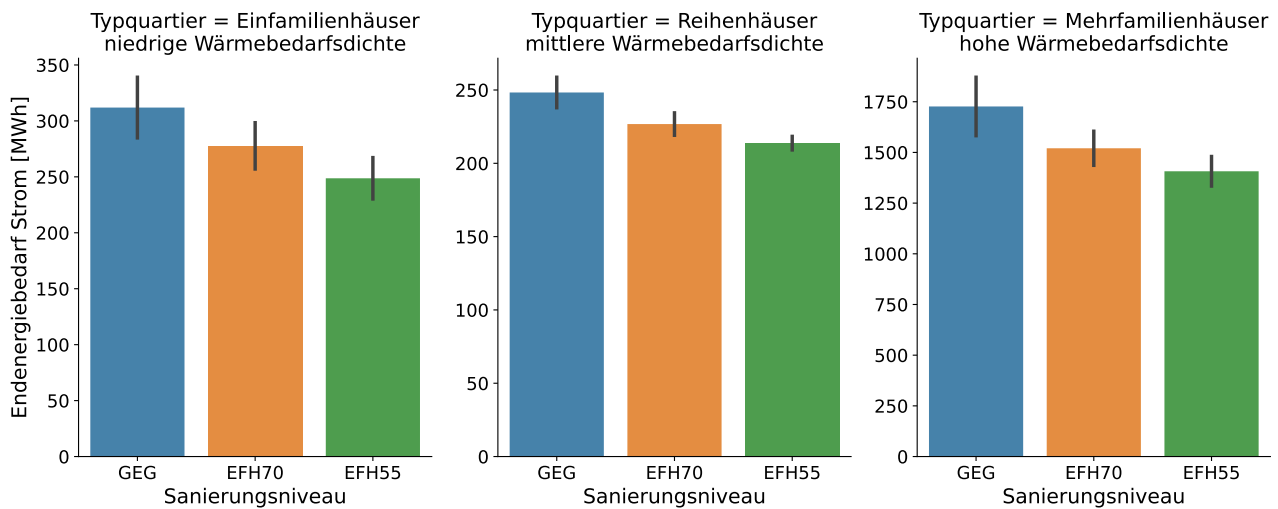


Abbildung 10: Gemittelte Endenergiebedarfe (Strom) in Abhängigkeit der Sanierungstiefe innerhalb der jeweiligen Szenarien.

Die Reduktion des Endenergiebedarfs führt zu einer entsprechenden Verringerung der Betriebskosten. Der Einfluss auf die definierten Gesamtkosten der Quartierskonzepte im Hinblick auf zentrale und dezentrale Wärmeversorgung ist in der Abbildung 11 dargestellt. Die Ergebnisse verdeutlichen, dass mit zunehmender Sanierungstiefe dezentrale Wärmeversorgungs-lösungen einen deutlich stärkeren Rückgang der Kosten aufweisen als zentrale Wärmeversorgungs-systeme, die über ein Wärmenetz betrieben werden. Dadurch nimmt die Wirtschaftlichkeit der zentralen Wärmenetz-lösungen im Vergleich zu den dezentralen Wärmelösungen ab. Dieser Effekt lässt sich auf die Entwicklung der Investitionskosten der Wärmeversorgungs-konzepte zurückführen, welche im Rahmen der Modellierung für das jeweilige Typquartier als konstant angenommen wurden. Im Gegensatz dazu werden Wärmepumpen aufgrund der geringeren Heizlast bei fortschreitender Sanierung kleiner dimensioniert und dadurch kostengünstiger. Zudem erhöht sich die Effizienz der Wärmepumpen mit sinkenden Vorlauf-temperaturen und zunehmender Sanierungstiefe. Infolgedessen sinken die Investitionskosten der dezentralen Wärmepumpen bei tiefergehender Sanierung deutlich stärker als jene der zentralen Wärmeversorgung. Letztere sind stärker von den Netzinvestitionskosten geprägt, die im Verhältnis zur bereitgestellten Wärmemenge einen größeren Anteil ausmachen.

Klimaneutrale Wärmeversorgung im Quartier: Grundlegende Entscheidungen

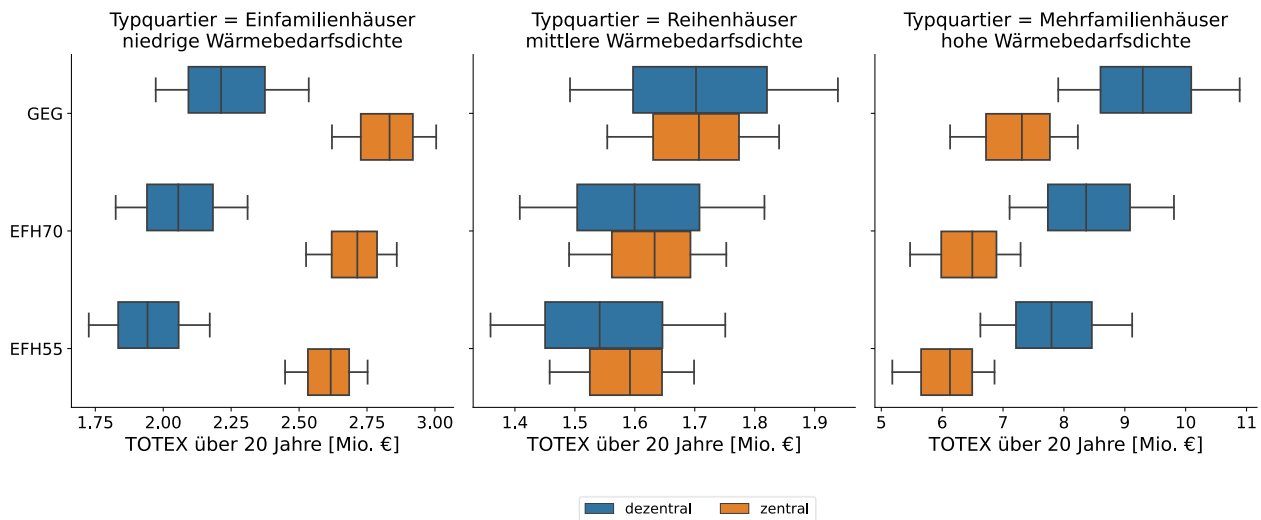


Abbildung 11: Einfluss der Sanierungstiefe auf die Gesamtkostenverteilung der Elektrifizierungsszenarien mit Gegenüberstellung der dezentralen und zentralen Wärmeversorgungsconzepte. Die hier dargestellten Gesamtkosten beziehen sich nur auf die Energieversorgungsinfrastruktur und beinhalten nicht die Kosten der Gebäudesanierung.

Dies verdeutlicht, dass bei der Wahl eines Quartiersversorgungsconzeptes die langfristige Entwicklung der Wärmebedarfe mitberücksichtigt werden sollte. Wie anhand des Beispiels der Reihenhaussiedlung dargestellt wurde, kann sich die wirtschaftliche Vorteilhaftigkeit eines Konzeptes entscheidend ändern. In der strategischen Planung von Wärmenetzen sollten deshalb auch stets Nachverdichtungspotentiale berücksichtigt werden, um ggf. durch Gebäudesanierung auftretende Wärmeabsatzverluste durch Anschluss neuer Gebäude zu kompensieren.

Der Einfluss der Sanierungstiefe auf die Gesamtkostenverteilung der Versorgungskonzepte zeigt neben einer allgemeinen Reduktion der Betriebskosten auch eine tendenziell geringere Streuung der Kosten innerhalb des jeweiligen Szenarienraums. Diese geringere Streuung ist im Wesentlichen auf den geringer werdenden Einfluss der Energiepreinsniveaus auf die Gesamtkosten durch die reduzierten Energiebedarfe bei einer tiefergehenden Sanierung zurückzuführen.

In Abbildung 12 wird die Reduktion der Kostensensitivität innerhalb des Szenarienraums für das jeweilige Typquartier dargestellt. Die Reduktion der Kostensensitivität beschreibt, wie stark die Differenz zwischen den höchsten und niedrigsten Gesamtkosten im Szenarienraum bei einer bestimmten Sanierungstiefe im Vergleich zur Differenz bei dem GEG-Sanierungsstandard abnimmt. Je höher die Reduktion der Kostensensitivität, desto geringer ist der Einfluss von Energiepreisschwankungen auf die Gesamtkosten des betrachteten Quartiersconzeptes. Ein Wert von 10 % bedeutet zum Beispiel, dass die Spannweite der Gesamtkosten innerhalb der Szenarien eines Typquartiers für eine bestimmte Sanierungsstufe um 10 % kleiner ist als bei den Szenarien mit GEG-Gebäudeeffizienz. Wie bereits bei den relativen Änderungen des Endenergiebedarfs diskutiert, spielt der Gebäudetyp hierbei eine zentrale Rolle. Bei freistehenden Einfamilienhäusern wird der

Klimaneutrale Wärmeversorgung im Quartier: Grundlegende Entscheidungen

größte Effekt erreicht, während bei Reihenhäusern die Reduktion der Kostensensitivität um bis zu 6 % geringer ist.

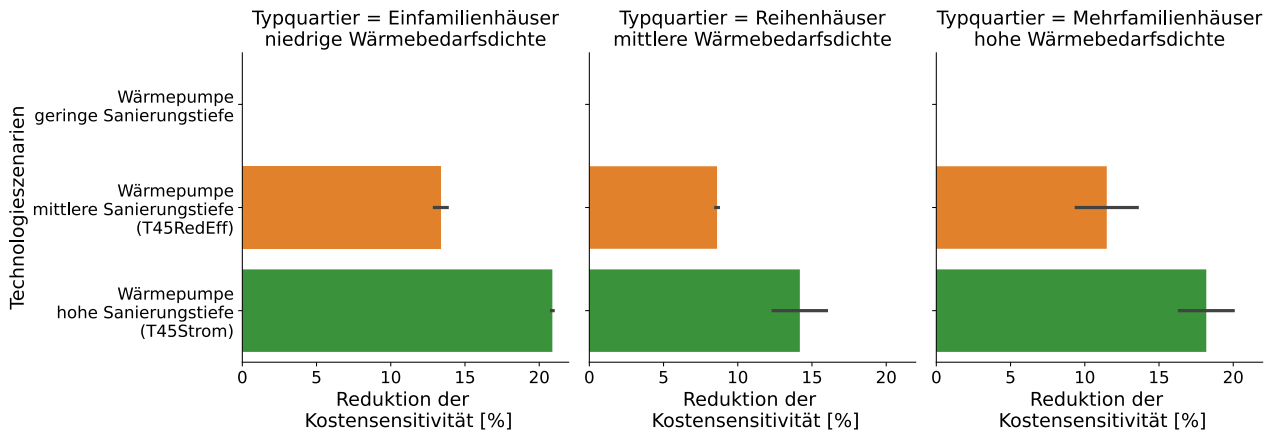


Abbildung 12: Darstellung der Reduktion der Kostensensitivität der Energieversorgungsinfrastruktur bei zunehmender Gebäudeeffizienz. Zur Erläuterung: Ein Wert von 10 % bedeutet bspw., dass der Unterschied zwischen den höchsten und niedrigsten Gesamtkosten innerhalb der Szenarien eines Typquartiers für eine bestimmte Sanierungstiefe um 10 % geringer gegenüber den Szenarien mit GEG-Gebäudeeffizienz ausfällt.

6. Fazit

Anhand der Untersuchung eines breiten Szenarienraums bestehend aus verschiedenen Technologieoptionen, Typquartieren und Energiepreiseentwicklungen wurden grundlegende Zusammenhänge identifiziert, die für die Planung von Quartierslösungen von Bedeutung sind. Dabei wurde der Fokus insbesondere auf die Themen *zentrale vs. dezentrale Wärmeversorgung*, *Elektrifizierung vs. Grüngasszenarien* und *Einfluss der Gebäudesanierung* gelegt. Die wesentlichen Erkenntnisse sind im Kapitel „Zusammenfassung der Kernergebnisse“ zu Beginn der Studie dargestellt. Eine weitergehende Diskussion der Limitationen der gewählten Methoden und Annahmen ist in Glombik et al. (2025) zu finden.

Allgemein lässt sich festhalten, dass im Einklang mit den Ergebnissen der BMWK-Langfristszenarien für das bundesweite Energiesystem auch auf lokaler Quartiersebene die Transformation des Energiesystems mit Fokus auf einer Elektrifizierung aus wirtschaftlicher Sicht die größten Vorteile mit sich bringen. Diese gehen jedoch im Allgemeinen mit höheren Anfangsinvestitionen einher als die heutigen üblichen Versorgungskonzepte, welche mit fossilen Gasen betrieben werden. Um langfristige Kostenvorteile zu sichern, müssen entsprechend der heutigen Rahmenbedingungen richtig aufgestellt werden, um etwaige Investitionshürden zu verringern.

Weitere potenzielle Untersuchungen sollten sich verstärkt mit der sozioökonomischen Ebene befassen, um eine breite Akzeptanz der lokalen Wärmewende in der Bevölkerung sicherzustellen. Dazu zählen beispielsweise Studien zu sozialverträglichen Geschäftsmodellen oder zur Beteiligung der Bürgerinnen und Bürger an Planungsprozessen. Ebenso sollte die Integrierbarkeit einer zunehmend elektrifizierten Wärmeversorgung in das übergeordnete Energiesystem und die bestehende Stromnetzinfrastruktur einen zentralen Schwerpunkt zukünftiger Untersuchungen zu Quartiersversorgungskonzepten bilden. Dabei sollten insbesondere die gezielte Nutzung lokaler Flexibilitätsoptionen sowie geeignete Anreizmodelle betrachtet werden.

7. Literaturverzeichnis

Bergmann, J. (2025). *Klimaneutrale Wärmeversorgung im Quartier - Konzepte im Vergleich: Wirtschaftlichkeit und sozio-ökonomische Folgewirkungen: Ein Beitrag aus Modul 3 Quartiere der Wissenschaftlichen Begleitforschung Energiewendebauen.*

C.A.R.M.E.N. e.V. (Ed.). *Merkblatt - Nahwärmenetze und Bioenergieanlagen. Ein Beitrag zur effizienten Wärmenutzung und zum Klimaschutz.* https://www.energiesystemtechnik.de/images/pdf/Merkblatt_Nahwaerme_CARMEN.pdf

Glombik, S., Schischke, E., Puyn, B., & Bergmann, J. (2025). *Klimaneutrale Wärmeversorgung im Quartier - Konzepte im Vergleich: Methoden & Annahmen: Ein Beitrag aus Modul 3 Quartiere der Wissenschaftlichen Begleitforschung Energiewendebauen.*

Mellwig, P., & Blömer, S. (2022). *Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland“ (Energienachfrage Gebäudesektor).* ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung.

Impressum

Wissenschaftliche Begleitforschung
Energiewendebauen – Modul 3 Quartiere

E-Mail: begleitforschung.quartiere@umsicht.fraunhofer.de

Internet: energiewendebauen.de

Autor:innen: Sebastian Glombik^a, Eva Schischke^a, Britta Puy^a

Mitwirkende: Janis Bergmann^b

^a Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik

^b Institut für ökologische Wirtschaftsforschung

Bildquellen sofern nicht explizit anders angegeben Wissenschaftliche Begleitforschung. Für den Inhalt und das Bildmaterial tragen allein die Autorinnen die Verantwortung. Alle Rechte vorbehalten.

DOI: 10.24406/publica-4542

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages