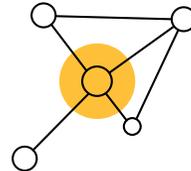
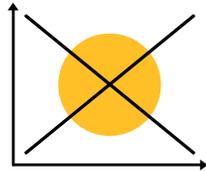
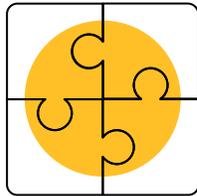
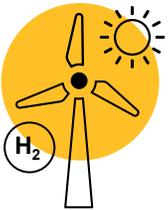


Zieltechnologien der Wärmewende

Wegweiser für eine zukunftsgerichtete Infrastrukturplanung

Gefördert durch: Förderinitiative Wärmewende der Gesellschaft zur Förderung
des Energiewirtschaftlichen Instituts an der Universität zu Köln e. V.



Energiewirtschaftliches Institut an der
Universität zu Köln gGmbH (EWI)

Alte Wagenfabrik
Vogelsanger Straße 321a
50827 Köln

 +49 (0)221 650 853-60

 <https://www.ewi.uni-koeln.de>

Verfasst von:

Philipp Artur Kienscherf (Projektleitung)
Berit Czock
Michael Moritz
Nicole Niesler

Bitte zitieren als:

EWI (2023) Zieltechnologien der Wärmewende.

Zusammenfassung

1. Zieltechnologien als Wegweiser der Wärmewende
2. Methodik
3. Zieltechnologien in beispielhaften Fokusgebieten

Datengrundlage und Literaturverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis

Anhang

Zusammenfassung

In dieser Analyse untersucht das EWI mögliche Zieltechnologien für die Wärmewende. Als Zieltechnologien werden solche Optionen betrachtet, die in einer langfristigen, strategischen Planung eine kosteneffiziente Option der Wärmeversorgung darstellen. Basierend auf grundlegenden Überlegungen der Kostenstruktur unterschiedlicher Technologieoptionen werden diese Anhand von Beispielgebieten analysiert.

Einflussparameter der Wärmegestehungskosten

Das zentrale Element der vergleichenden Analyse sind die Wärmegestehungskosten. Als solche werden alle relevanten Kostenbestandteile der Investition und des Betriebs eines Heizsystems bezeichnet.

Wärmegestehungskosten verknüpfen alle Kosten eines Heizsystems, so die Investitions- und Installationskosten, Kosten der maßgeblichen Energieträger sowie Wartungs- und Instandhaltungskosten. Außerdem gehen Parameter wie Zinssätze oder Lebensdauer in sie ein.

Die Wärmegestehungskosten berechnen wir für eine Vielzahl in Frage kommender Zieltechnologien. Dabei zeigt sich, dass in den meisten Fällen entweder Wärmepumpen oder Wasserstoffheizungen die effizientesten Optionen sein können.

Zentrale und dezentrale Wärmewende

Verschiedene Heizsysteme, beispielsweise Wärmepumpen oder Wasserstoffkessel, können sowohl dezentral als auch zentral eingesetzt werden. Als dezentrale Systeme bezeichnen wir solche, in denen die Wärmebereitstellung innerhalb des jeweiligen Gebäudes erfolgt. Bei der zentralen Wärmebereitstellung wird die Wärme zentral erzeugt und über ein Wärmenetz den Haushalten zur Verfügung gestellt.

Maximale zusätzliche Infrastrukturkosten

Während die Kostenstruktur kommerziell verfügbarer Systeme schon heute bekannt ist, gilt dies für Zukunftstechnologien nicht. Heizsysteme sind demnach nur dann effiziente Zieltechnologien, wenn ihre Kostenersparnisse nicht durch Zusatzkosten im Betrieb der zugehörigen Infrastruktur überkompensiert werden. Die vorliegende Analyse untersucht diese „maximalen Zusatzkosten“ für verschiedene Alternativen:

1. *Dezentrale und Zentrale Wärmepumpensysteme*
2. *Dezentrale Wasserstoffkessel und zentrale Wärmepumpensysteme*

Zusammenfassung

Praxisbezug

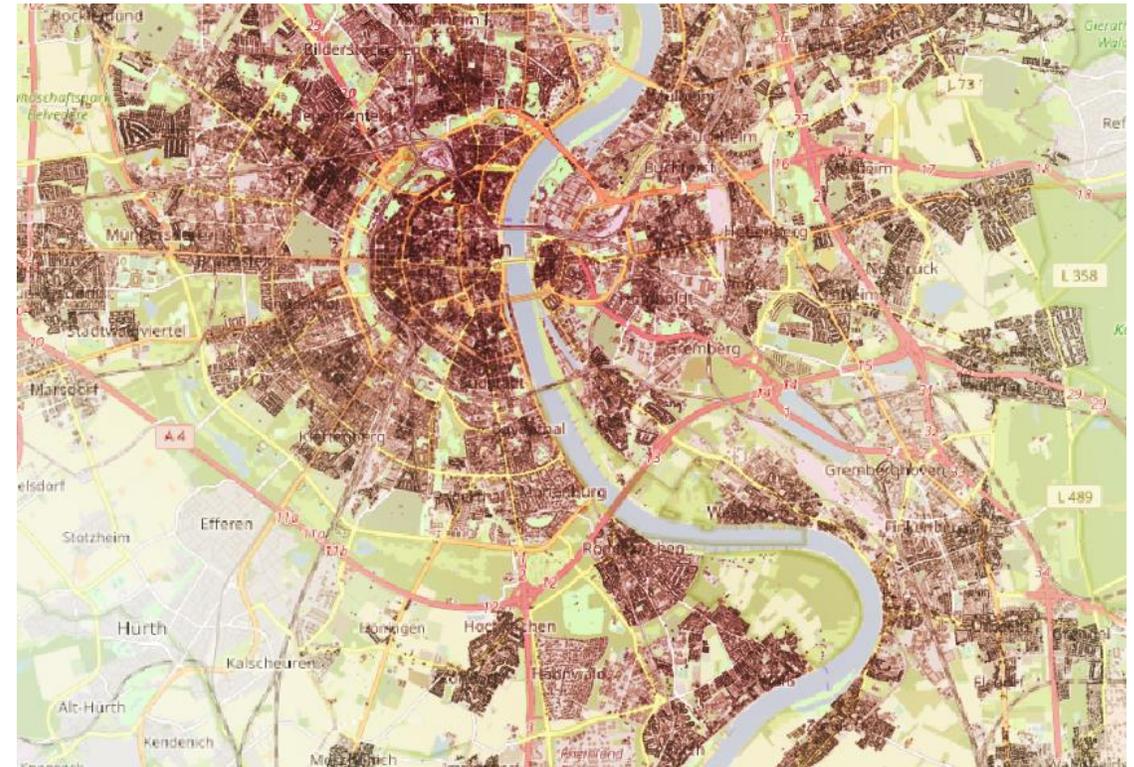
Die Berechnungsmethodik von Wärmegestehungskosten und maximalen Zusatzkosten ist zunächst eine theoretische Überlegung. Um die Auswirkungen auf konkrete Siedlungsgebiete zu untersuchen, berechnet diese Analyse Zieltechnologien für ausgewählte Beispielgebiete.

Städtisch oder ländlich

Um ein großes Spektrum möglicher Gebiete zu untersuchen, wird sowohl ein urbanes Beispielgebiet mit einer Blockbebauung als auch ein dörfliches Gebiet mit zumeist freistehender Bebauung untersucht. Hierbei lassen die Ergebnisse der Berechnungen trotz einiger Unsicherheiten verschiedene Rückschlüsse auf effiziente Zieltechnologien zu:

1. *Zentrale Wärmepumpensysteme sind oft günstiger als dezentrale Wärmepumpensysteme. Dies hängt mit den starken Skaleneffekten in der Kostenstruktur von Großwärmepumpen zusammen, die Ersparnisse oberhalb erwartbarer Wärmenetzkosten ermöglichen*
2. *Wasserstoffheizungen sind nur bei niedrigen Wasserstoffpreisen und hoher Verfügbarkeit von Wasserstoff wirtschaftlich. Sie geben die Unsicherheit über den Wasserstoffpreis direkter weiter als Wärmepumpen.*

Wärmebedarfskarte der Stadt Köln



Eigene Darstellung auf Basis der Datengrundlage von © OpenStreetMap (2023), SimStadt 2.0 (2021), Stadt Köln (2023a) und dem Wärmekataster NRW (2023). Die ausgewählten Beispielgebiete sind durch Markierungen gekennzeichnet.

1. Zieltechnologien als Wegweiser der Wärmewende

1.1 Motivation

1.2 Politische Instrumente der Wärmewende

1.3 Herausforderungen der Infrastrukturplanung

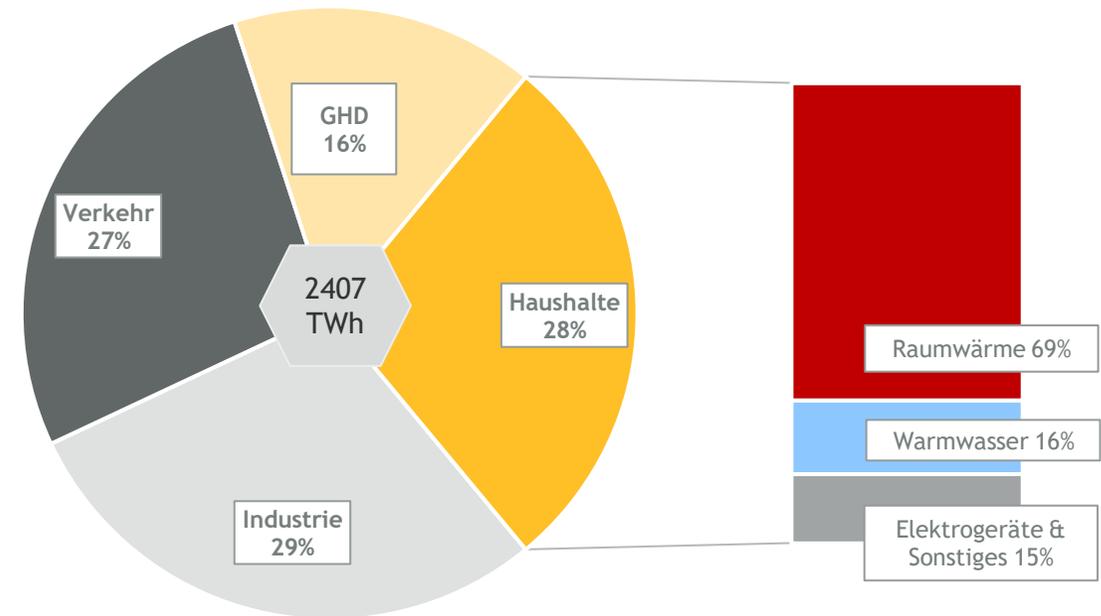
Eine klimaneutrale Wärmeversorgung für die Zukunft

Über die Hälfte des gesamten Endenergieverbrauchs in Deutschland entfällt auf Wärme, wobei diese für eine Vielzahl von Anwendungen wie Raumwärme, Prozesswärme, Warmwasser, Klimatisierung und Kälteerzeugung genutzt wird. Wobei in privaten Haushalten rund 85% der Endenergie für Raumwärme und Warmwasseranwendungen verbraucht wird (UBA, 2023). Ziel der Bundesregierung ist es bis zum Jahr 2030 50% der Wärme klimaneutral zu erzeugen (Koalitionsvertrag, 2021; GesEntw WPG).

In Deutschland heizt aktuell mehr als die Hälfte der Haushalte mit fossilem Erdgas (Destatis, 2023). Zur Senkung des Endenergiebedarfs für Wärme und damit auch der CO₂-Emissionen im deutschen Gebäudesektor ist eine **Umstellung von fossilen Brennstoffen auf klimaneutrale Energieträger erforderlich**. Dies kann beispielsweise durch den Einsatz von Substituten für konventionelle Brennstoffe, kohlenstofffreie Energieträger wie Wasserstoff oder eine direkte Elektrifizierung mit Hilfe von Wärmepumpen erfolgen.

Die **Dekarbonisierungsoptionen des Wärmesektors sind mit Investitions-, Energie- und Infrastrukturkosten verbunden**, wobei unklar ist, welche Lösung oder Lösungen langfristig die wirtschaftlichste sein werden.

Endenergieverbrauch 2021 nach Sektoren



Eigene Darstellung basierend auf Umweltbundesamt (2023) auf Basis von AG Energiebilanzen (Auswertungstabellen zur Energiebilanz der Bundesregierung, Datenstand 09/20022 & Anwendungsbilanzen, Datenstand 02/2023).

Unsicherheiten bei Investitionsentscheidungen

Die **Unsicherheit über die langfristig kostengünstigsten Wärmeerzeuger** stellt insbesondere für Kommunen und Haushalte eine große Herausforderung dar, da nicht allein die gegenwärtigen Wärmekosten und -bedarfe, sondern auch die Ausrichtung der leitungsgebundenen Wärmeinfrastruktur berücksichtigt werden muss.

Um diese Unsicherheiten greifbarer zu machen, müssen die unterschiedlichen Determinanten für wirtschaftliches Heizen systematisch untersucht und dabei in Beziehung zueinander gestellt werden. Im Fokus stehen insbesondere Fragen zur Integration erneuerbarer Energien in bestehende Gasnetze, das Potenzial von Power-to-Gas, die Rolle von Wasserstofftechnologien sowie die zukünftige Bedeutung von Wärmenetzen.

Das Wissen über potenzielle **Zieltechnologien der Wärmewende** und relevante Einflussfaktoren ermöglicht Entscheidungsträgern eine strategische Planung der Wärmeinfrastruktur. Dabei sollte der Fokus gleichermaßen auf der **Kosteneffizienz** sowie einer **Risikobewertung** liegen. Parallel erleichtert dieses Wissen frühzeitige Maßnahmen der Raumplanung sowie eine gezielte Kommunikation gegenüber dem Gewerbe und den Haushalten.

Aspekte der (langfristigen) Wärmeplanung werden in der aktuellen energiepolitischen Diskussion vor allem im Zusammenhang mit der **Novelle des Gebäudeenergiegesetz (GEG-Novelle, 2023)** und der **kommunalen Wärmeplanung (Wärmeplanungsgesetz)**, diese bilden den regulatorischen Rahmen der Wärmewende (GesEntw WPG).



Das Gebäudeenergiegesetz in der Umsetzung

Die Installation von Heizsystemen wird über das **Gebäudeenergiegesetz (GEG)** reguliert. Die aktuelle Novelle des GEG, welche am 08.09.2023 durch den Bundestag beschlossen wurde, verpflichtet bei Installation eines neuen Heizungssystems nur Heizungen zu verbauen, die mit **mindestens 65% erneuerbarer Energien** betrieben werden (BMWK, 2023).

Dabei sieht die GEG-Novelle unmittelbare Erfüllungsoptionen (z.B. Wärmepumpe, Biomasse) aber auch mittelbare (z.B. Wärmenetze und wasserstofffähige Gasheizungen) vor. Auch die Installation von neuen Gas- oder Ölheizungen bleibt in den kommenden Jahren in verschiedenen Kombinationen zulässig, so z.B. als Hybridlösung mit einer Wärmepumpe oder einer Solarthermieanlage, unter Verwendung grüner Gase oder befristet im Rahmen der verschiedenen Übergangsfristen und Ausnahmeregelungen.

Ab 2024 sind die Neuerungen der GEG-Novelle für Neubauten in Neubaugebieten bindend, während für Bestandsgebäude und Neubauten in Baulücken längere Übergangsfristen gelten. In Großstädten ist somit der Einbau von Heizungen mit 65% erneuerbarer Energie ab Mitte 2026 und in kleineren Gemeinden ab Mitte 2028 verpflichtend. Diese Fristen stehen in direktem Zusammenhang mit den Verpflichtungen, die aus dem Wärmeplanungsgesetz hervorgehen. Allein das Vorliegen eines Wärmeplans löst die Verpflichtungen des GEG jedoch nicht aus (GEG-Novelle, 2023).



Vielmehr ist zusätzlich ein darauf aufbauender und öffentlich bekanntzugebender Gebietsausweisungsbeschluss der Stadt oder der Gemeinde erforderlich. Entscheidet sich eine Kommune frühzeitig für die Ausweisung eines Gebiets zum Neu- oder Ausbau eines Wärmenetzes oder zum Ausbau eines Wasserstoffnetzes, ist ab diesem Zeitpunkt der Einbau von Heizungen mit 65% erneuerbaren Energien verpflichtend.

Diese Vorgaben werden u.a. durch Anpassungen im Baugesetzbuch flankiert, die die bauplanungsrechtliche Umsetzung der Wärmeplanung begleiten sollen (GesEntw WPG).

Während das Gebäudeenergiegesetz also individuelle Entscheidungen reguliert, bildet das Wärmeplanungsgesetz den strategischen Rahmen.

Zukunftsfähige Infrastruktur gestalten

Um den Heizungsinstallationen im Rahmen des GEG einen Rahmen zu geben, hat das Bundeskabinett am 16.08 dem Referentenentwurf des **Gesetzes für die Wärmeplanung und zur Dekarbonisierung der Wärmenetze**, auch Wärmeplanungsgesetz (WPG), zugestimmt (GesEntw WPG).

Das Ziel des WPG ist es, den Wärmesektor in Deutschland bis 2045 mithilfe einer verpflichtenden, flächendeckenden Wärmeplanung zu dekarbonisieren.

Gemäß dem Gesetzesentwurf müssen die Bundesländer sicherstellen, dass Wärmeversorgungspläne bis zum 30.06.2026 für Großstädte und bis zum 30.06.2028 für kleinere Gemeinden und Städte erarbeitet werden. Diese Verpflichtung kann seitens der Bundesländer auf die Kommunen oder andere Planungsträger übertragen werden. In einigen Bundesländern gibt es bereits landesgesetzliche Regelungen, welche die Verpflichtung zur Erstellung von Wärmeplänen regeln (GesEntw WPG).

Grundlage der Wärmeplanung sind Bestands- und Potenzialanalysen der örtlichen Gegebenheiten. Auf deren Basis wird ein Zielszenario entworfen, das neben der Ausweisung der zu erwartenden Wärmeversorgungsgebiete auch eine konkrete Umsetzungsstrategie beinhalten muss. Über die Pflicht zur Wärmeplanung hinaus legt das WPG fest, dass bis 2030 die Hälfte der leitungsgebundenen Wärmeversorgung über Wärmenetze klimaneutral erzeugt werden soll.



Neue Wärmenetze müssen ab 2024 zu mindestens 65% aus erneuerbaren Energien und/oder nicht vermeidbarer Abwärme gespeist werden. Die Umstellungsfristen für bereits bestehende Netze wurden auf 30% bis 2030 und 80% bis 2040 verlängert. Ab 2045 muss die Fernwärmeversorgung vollständig klimaneutral erfolgen (GesEntw WPG).

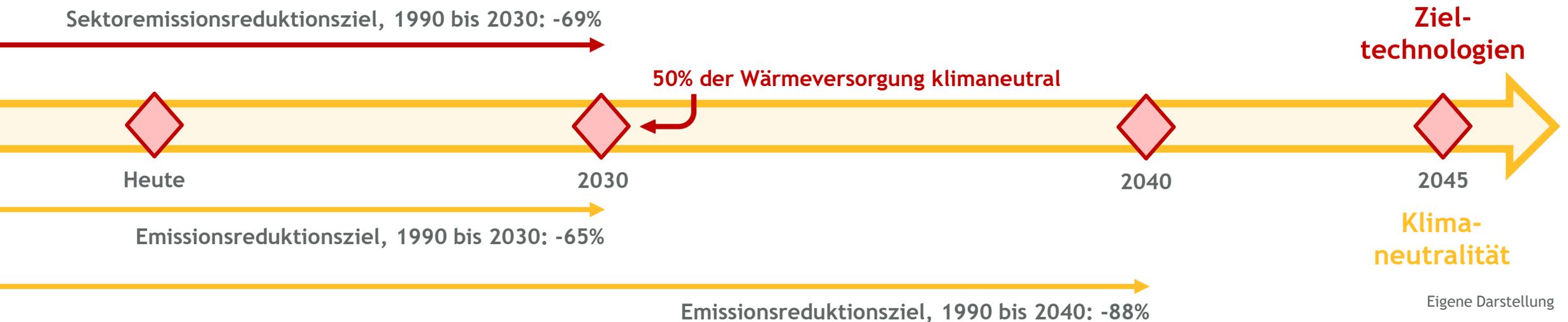
Erfüllt ein Wärmenetz diese Anforderungen nicht, hat der Letztverbraucher das Recht, sich von diesem Wärmenetz zu trennen und eine Heizungstechnologie zu installieren, die die Anforderungen des GEG erfüllt. Dies gilt nicht bei einer vorübergehenden Nichterfüllung oder absehbarer Zielerreichung.

Durch das WPG werden nicht nur Anforderungen an Kommunen und Wärmeversorger gestellt, sondern ihnen auch eine **gestaltende Rolle** in der Wärmeplanung zugewiesen.

Eine langfristige Perspektive

Die aktuellen gesetzgeberischen Prozesse und politischen Debatten um die zukünftige Wärmeversorgung zeigen, dass die Wahl geeigneter Wärmeerzeugungstechnologien ein komplexes Unterfangen ist, das private und öffentliche Investitionen koordinieren muss. Um informierte Entscheidungen zu treffen zu können, die sowohl langfristig effizient als auch sozial und klimapolitisch tragfähig sind, ist eine breit angelegte und zukunftsorientierte Perspektive erforderlich.

Die **Zieltechnologien der Wärmewende** stellen den ökonomisch günstigsten Endzustand der Wärmewende dar. Sie bieten entscheidende Orientierungspunkte für die Investitionen in leitungsgebundene Infrastrukturen im Rahmen der kommunalen Wärmeplanung. Die vorliegende Analyse abstrahiert von individuellen Entscheidungen und der Dynamik der Umstellung, auch von regulatorischen Aspekten, bspw. dem Mieter/Vermieter-Verhältnis. Die ermittelten Zieltechnologien sind somit keine unmittelbare Handlungsempfehlung, sondern setzen **Leitplanken für strategische Entscheidungen**.



Dimensionen von Zieltechnologien

Die Umstellung auf eine klimaneutrale Wärmeversorgung erfordert maßgeschneiderte Lösungen, **die sich an den lokalen Gegebenheiten orientieren**. Der Aufbau neuer leitungsgebundener Infrastruktur dauert Jahre bis Jahrzehnte. Deshalb muss mit der Infrastrukturplanung frühzeitig begonnen werden. Gleichzeitig ist es zur Vermeidung von Lock-in-Effekten notwendig, den Einsatz von **Brückentechnologien zu begrenzen**. Externe Faktoren wie lange Sanierungszyklen und Fachkräftemangel erschweren diese Herausforderung zusätzlich.

Durch den Ausstieg aus der (erd-)gasbasierten Wärmeversorgung könnten **Wärmenetze aufgrund der Skaleneffekte von Wärmepumpen zukünftig eine größere Rolle spielen**. Bisher waren Wärmenetze lediglich in dicht besiedelten Räumen wie Stadtzentren und beim Einsatz von Kraft-Wärme-Kopplung oder der Verfügbarkeit von Abwärme kosteneffizient, was sich aber aufgrund der Vorteile von Großwärmepumpen ändern könnte (Ariadne, 2023; dena, 2023).



Folgende Forschungsfragen ergeben sich daher für die nachfolgende Analyse:

1. Welche klimaneutralen Wärmeerzeuger können unter welchen Bedingungen zukünftig am kostengünstigsten Wärme bereit stellen?
2. Welche Rolle spielen Wärmenetze und was dürfen sie kosten?

Der Suchraum für Zieltechnologien



Eigene Darstellung.

2. Methodik

- 2.1 Kostenfunktionen und Datengrundlage
- 2.2 Kalibrierung repräsentativer Heizungssysteme
- 2.3 Berechnung von Stromgestehungskosten
- 2.4 Maximale zusätzliche Infrastrukturkosten

Ermittlung von Kostenfunktionen

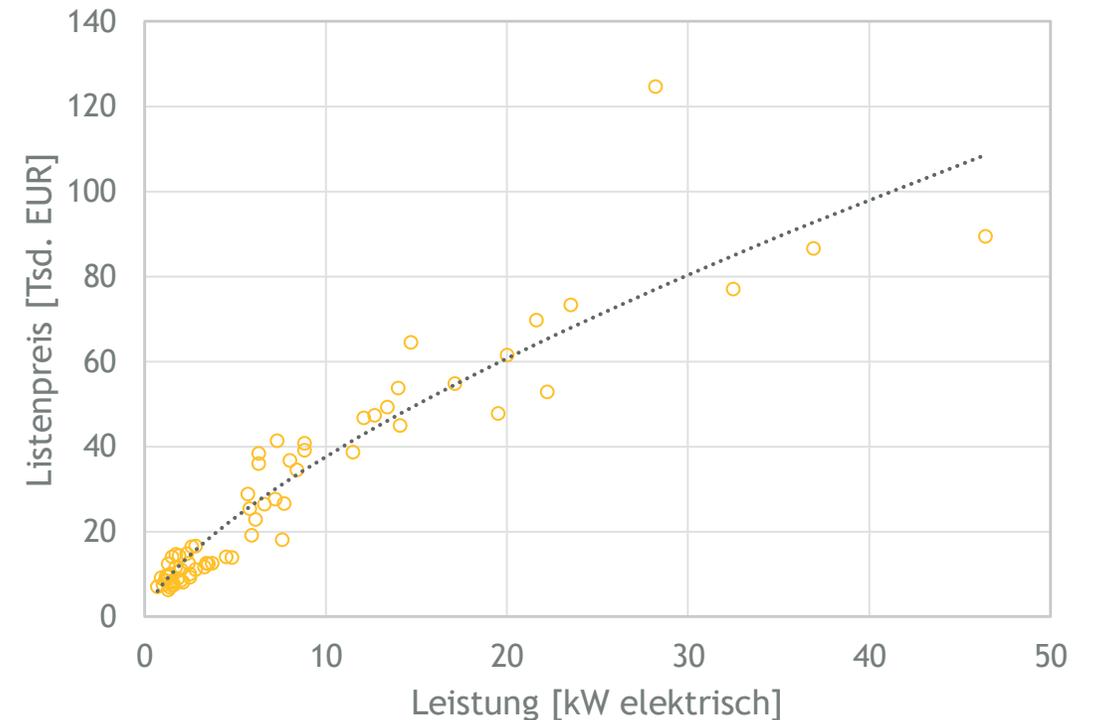
Ein wichtiger Treiber der Wärmegestehungskosten eines Heizsystems sind Investitions- und Installationskosten. Für unsere Analyse nutzen wir **datenbasierte Kostenfunktionen**. Um diese zu ermitteln, haben wir Daten zu den Listenpreisen der Hersteller Buderus, Elco, Vaillant und Viessman für die folgenden Komponenten gesammelt:

Luft-Luft-Wärmepumpen, Luft-Wasser-Wärmepumpen, Wasser-Wasser-Wärmepumpen, Gas-Brennwertkessel, Elektrokessel, Elektro-Durchlauferhitzer, Pufferspeicher, Warmwasserspeicher und Heizstäbe.

Darüber hinaus haben wir Daten zu den Installationskosten von Gas-Brennwertkesseln und Luft-Luft-Wärmepumpen von verschiedenen Heizungsfirmen erhoben. Aus den gesammelten Daten werden Kostenfunktion in Abhängigkeit der installierten Leistung ermittelt oder des Speichervolumens ermittelt.

Aufgrund der **Unsicherheit der langfristigen Kostenentwicklung** verschiedener Technologien und der jeweiligen Installationskosten nutzen wir in dieser Analyse aktuelle Kostendaten. Sollten Kostendegressionen oder -steigerungen einzelne Technologien zukünftig stärker betreffen als andere, können sich Ergebnisse dementsprechend ändern.

Datenbasierte Schätzung der Investitionskosten von Wärmepumpen



Ermittelte Kostenfunktion für Luft-Wasser Wärmepumpen. Die Investitionskosten lassen sich mittels einer Exponentialfunktion schätzen. Quelle: Buderus (2022), Elco (2023), Vaillant (2023) und Viessmann (2023)

$$\text{Investitionskosten} = 7,689 * \text{Leistung}^{0.69} \text{ [Tsd. EUR]}$$

Auslegung zukünftiger Heizungssysteme

Während wir für bereits kommerziell erhältliche Technologien Listenpreise nutzen können, ist dies für Zukunftstechnologien nicht möglich. Wasserstoffkessel sind beispielsweise noch nicht kommerziell erhältlich. Nach Einschätzung eines Herstellers liegen die **Investitionskosten von Wasserstoff-Brennwertkesseln 10% höher als die Investitionskosten von Gas-Brennwertkesseln**. Die Installationskosten von Fernwärmestationen und Elektrokesseln werden auf der Grundlage der Installationskosten von Gas-Brennwertkesseln.

Nach Angaben eines Heizungsunternehmens sind die **Installationskosten einer Fernwärmestation um 10% niedriger als die eines Gas-Brennwertkessels**, da kein Kaminanschluss erforderlich ist. Die Installation eines Elektrokessels kostet 20% weniger, da weder ein Kaminsystem noch ein Gasanschluss erforderlich ist. Die Fixkosten für Betrieb und Wartung (FOM) von Wärmepumpen und Heizkesseln basieren auf einer **Experteneinschätzung eines Heizungsunternehmens** (Moritz & Bramer, 2023). Die FOM von Fernwärmeübergabestationen entsprechen den FOM von Gaskesseln. Die jährlichen FOM-Kosten des Brunnens für Wasser-Wasser-Wärmepumpen werden mit 3% der Investitionskosten berechnet (nPro, 2023). Die Investitionskostenfunktionen beruhen auf den Listenpreisen der Hersteller (Buderus, 2022; Elco, 2023; Vaillant, 2023, Viessmann, 2023).

Üblicherweise schlagen die Heizungsfirmen für die Installation einen Deckungsbeitrag auf die Materialkosten auf, um ihre administrativen Kosten zu decken. Wir nehmen für unsere Berechnungen einem Deckungsbeitrag von 50% auf die Großkomponenten an. Die Kosten für Kleinmaterialien sind in den Installationskostenfunktionen enthalten.

Unsere Berechnungen zeigen, dass abhängig von der Kostenentwicklung des Energieträgers Wasserstoff in den meisten Fällen Luft-Wasser-Wärmepumpen, Wasser-Wasser-Wärmepumpen oder Wasserstoffkessel die wirtschaftlichsten Wärmeerzeugungstechnologien sind. Deshalb konzentriert sich die Analyse im Folgenden auf die Heizsysteme LW/WW-Wärmepumpen und Wasserstoffkessel.

Ein Vergleich der Wärmegestehungskosten aller betrachteten Technologien kann dem Anhang entnommen werden. Insgesamt wurden im Zuge der Analyse folgende Technologien verglichen: Wasserstoffheizungen, mit synthetischem Methan betriebene Gasheizungen, Luft-Luft Wärmepumpen, Luft-Wasser Wärmepumpen und direktelektrische Heizungen. Die Analyse konzentriert sich bei Wärmepumpen auf die Wärmequellen Luft und Wasser, da diese am breitesten verfügbar sind.

Unsicherheit über den Wasserstoffpreis

Das Szenario der Analyse in einem klimaneutralen Energiesystem in Deutschland angesiedelt. Gemäß gängiger Klimaneutralitätsstudien wird Wasserstoff im dekarbonisierten Energiesystem eine wichtige Rolle einnehmen (EWI, 2022). Wasserstoff kann dabei sowohl eine direkte Verwendung finden als auch zur Stromerzeugung genutzt werden. Es ist allerdings ungewiss, welcher Preis für **grünen Wasserstoff** sich Deutschland langfristig einstellen wird.

Drei Gründe für diese Ungewissheit sind:

1. Heute sind die Produktionsmengen von grünem Wasserstoff im Vergleich zu den Mengen von Öl und Gas gering. Steigende Produktionsmengen führen zu Skaleneffekten, welche die Produktionskosten senken können. Das Ausmaß der Kostendegression aufgrund von Skaleneffekten ist unklar.
2. Die Kosten des Wasserstofftransports hängen von der Infrastruktur ab, die noch nicht aufgebaut ist. Art und Umfang der Transportinfrastruktur haben einen großen Einfluss auf die Kosten - insbesondere weil bis zu 90% des benötigten Wasserstoffs importiert werden könnte.
3. Es ist ungewiss, ob sich ein kostenbasierter oder marktbasierter Wasserstoffpreis einstellen wird, da sich noch kein Wasserstoffmarkt entwickelt hat.

Um eine große, aber realistische Bandbreite möglicher Preisentwicklungen abzudecken, deckt unsere Analyse mit **Wasserstoffpreisen zwischen 50 und 300 EUR/MWh** eine weite Spanne möglicher Preisentwicklungen ab. Der Einfluss des Wasserstoffpreises auf die Strompreise hängt von verschiedenen Annahmen über die zukünftige **Funktionsweise des Strommarktes** ab.

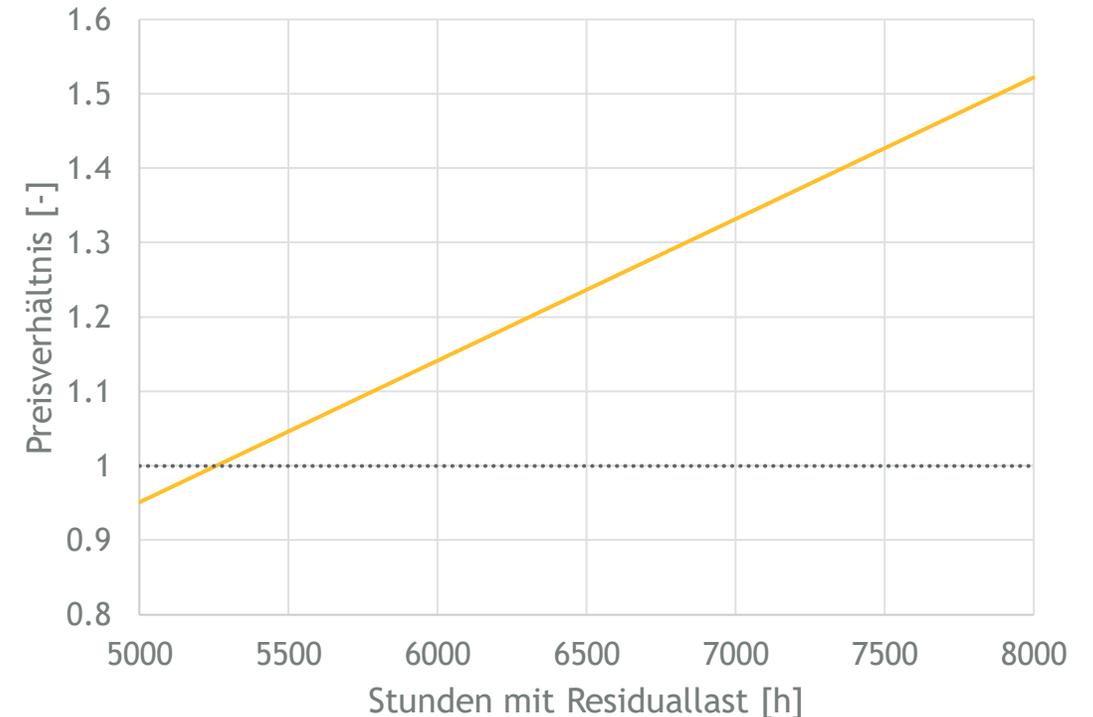
Einfluss des Wasserstoffpreises auf den Stromsektor

Vereinfacht wird angenommen, dass der Strompreis für alle Kunden durch den Spotpreis an der Strombörse bestimmt wird. Wir nehmen einen stilisierten Kraftwerkspark an, der aus zwei Kraftwerkstypen besteht: **Erneuerbare Energien und Wasserstoffkraftwerken.**

Die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien ist aufgrund der Volatilität von Sonne und Wind schwankend. **Daher kann die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien nicht gesteuert oder geplant werden, um einen bestimmten Bedarf zu decken.** Die Differenz zwischen dem Bedarf und der Erzeugung aus erneuerbaren Energien wird als Residuallast bezeichnet.

Die Residuallast ist Null, wenn die Erzeugung aus erneuerbaren Energien größer oder gleich dem Verbrauch ist. Ist die Residuallast größer als Null, wird sie durch flexible und regelbare Wasserstoffkraftwerke gedeckt. Simulationen eines klimaneutralen deutschen Strommarktes mit dem EWI-Modell DIMENSION zeigen für verschiedenen Szenarien, dass die **Residuallast in 5000 bis 8000 Stunden pro Jahr größer als Null sein kann.** Gemäß dem angenommenen Strommarkt setzen Wasserstoffkraftwerke den Strompreis in Stunden mit Residuallast. Erneuerbare Energien setzen den Strompreis in Stunden ohne Residuallast. An der Strombörse bieten die Kraftwerke ihren Strom zu ihren Grenzkosten an. Die Grenzkosten der erneuerbaren Energien sind gleich Null. Die Grenzkosten der Wasserstoffkraftwerke werden durch den Wasserstoffpreis und den Wirkungsgrad des Kraftwerks bestimmt.

Preisverhältnis von Strom und Wasserstoff



Abhängigkeit des Preisverhältnis von Strom und Wasserstoff von der Anzahl der jährlichen Stunden mit Residuallast. Ein Preisverhältnis von 1,1 bedeutet, dass Strom 1,1 mal so teuer ist wie Wasserstoff.

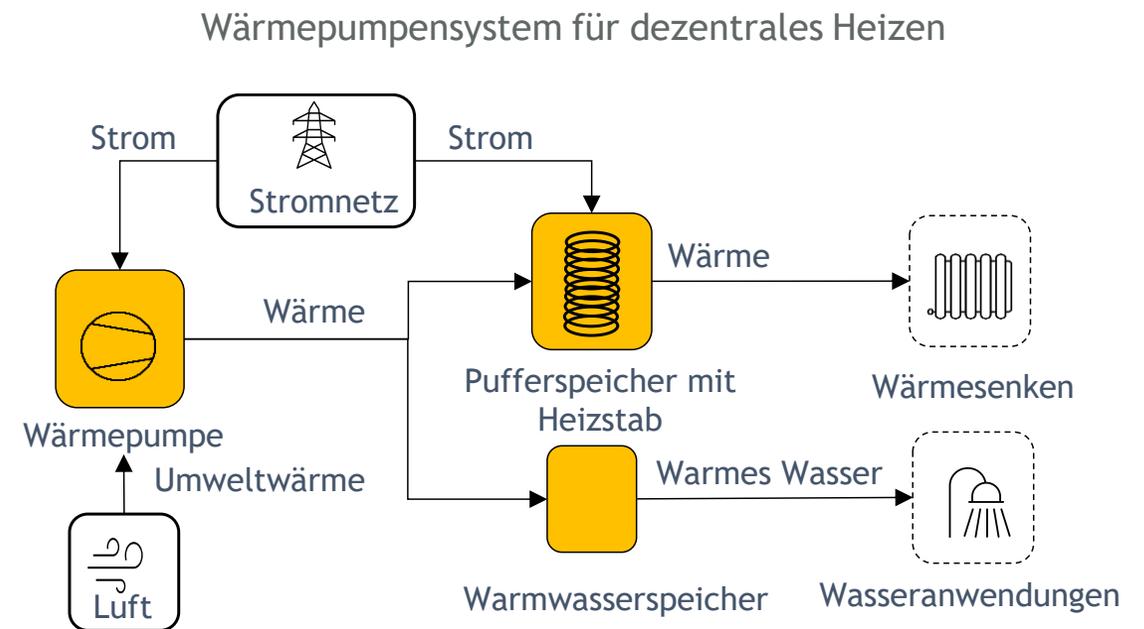
Für die Effizienz der Wasserstoffkraftwerke wird ein Wert von 60% angenommen. Hieraus lässt sich abhängig von der Stundenzahl positiver Residuallast ein Verhältnis von Strom- und Wasserstoffpreisen berechnen.

Auslegung repräsentativer Heizungssysteme

Die Analyse verwendet repräsentative Heizungssysteme, um einen standardisierten Vergleich der Stromgestehungskosten verschiedener Heizungssysteme zu ermöglichen. **Wir haben jeweils zwei stilisierte Systeme für dezentrales und zwei Systeme für zentrales Heizen ausgelegt.** Die folgenden allgemeinen Annahmen gelten für alle Heizungssysteme

Die Leistung des Wärmeerzeugers ist so ausgelegt, dass er sowohl Heizung als auch Warmwasser liefert. Luft-Wasser-Wärmepumpen sind gemäß den Planungsunterlagen eines Herstellers für den bivalenten monoenergetischen Betrieb ausgelegt. **Dadurch wird die installierte Leistung der Wärmepumpe gering gehalten, und die Spitzenlast durch einen Heizstab abgedeckt wird.**

Bei dezentralen Heizsystemen erfolgt die Wärmeerzeugung im Gebäude selbst. Die Wärme wird für Raumheizung und Warmwasserbereitung genutzt. Die Analyse umfasst die dezentralen Heizungssysteme Wasserstoff-Brennwertkessel und Luft-Wasser Wärmepumpe.

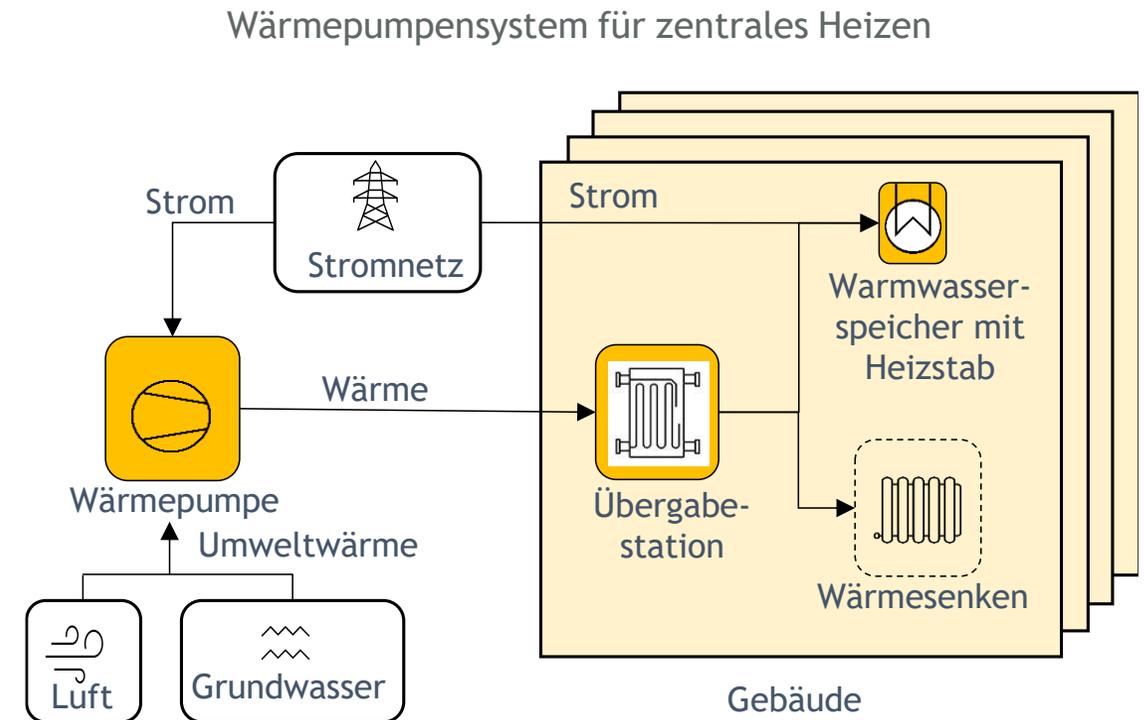


Komponenten und Energieflüsse in den generischen Wärmepumpensystemen für zentrales und dezentrales Heizen

Annahmen über zentrale Heizsysteme

Bei zentralen Heizsystemen wird die Wärme in einer Wärmezentrale erzeugt und über ein Wärmenetz an die Gebäude verteilt. Die Heizkreisläufe der Gebäude und das Wärmenetz sind hydraulisch getrennt. **Eine Übergabestation in den Gebäuden überträgt die Wärme aus dem Wärmenetz in den Heizkreislauf des Gebäudes.** Warmwasserbereitung erfolgt im Gebäude über Wärme aus dem Wärmenetz. Ist die Temperatur des Wärmenetzes zu gering, um eine Warmwassertemperatur von 60°C zu ermöglichen, wird das Warmwasser teilweise direkt elektrisch erwärmt. Die Analyse umfasst die folgenden zentralen Heizsysteme: Gas-Brennwertsystem, ein Wasserstoff-Brennwertsystem, ein Luft-Wasser-Wärmepumpensystem und ein Wasser-Wasser-Wärmepumpensystem.

In einem Wärmenetz haben nicht alle Verbraucher gleichzeitig ihre Spitzenlast. **Daher kann die Leistung des zentralen Wärmeerzeugers kleiner ausgelegt als die Summe der Heizlast aller versorgten Gebäude.** Unsere Analyse verwenden eine Funktion zur Abschätzung des Gleichzeitigkeitsfaktors von Wärmenetzen in Abhängigkeit von der Anzahl der Verbraucher für die Auslegung des zentralen Wärmeerzeugers (Winter et al., 2001).



Komponenten und Energieflüsse in den generischen Wärmepumpensystemen für zentrales und dezentrales Heizen

Betriebsweise von Wärmepumpen

Wärmepumpen transportieren Wärme von einer kälteren Wärmequelle zu einer wärmeren Wärmesenke. Damit dieser Prozess funktioniert, muss über einen (in der Regel elektrischen) Kompressor Energie zugeführt werden. Die Wärmequelle ist die Umwelt, zum Beispiel die Umgebungsluft oder das Grundwasser. Die an die Wärmesenke abgegebene Energie entspricht der Summe der über den Kompressor eingebrachten Energie sowie der Wärmequelle entnommenen Energie. **Deshalb ist die erzeugte Wärme einer Wärmepumpe größer als ihr Stromverbrauch.** Das Verhältnis von Wärmeerzeugung und Stromverbrauch wird als coefficient of performance, COP, bezeichnet. Vereinfacht gesprochen misst der COP einer Wärmepumpe ihre Effizienz.

In der Theorie hängt der COP von der **Temperaturdifferenz zwischen Wärmequelle und Wärmesenke** während des Betriebes ab. Je geringer der Temperaturunterschied zwischen der Senke und der Quelle ist, desto höher ist der COP. Die Temperatur der Wärmesenke stellt die Vorlauftemperatur des Heizsystems dar. Die Temperatur der Wärmequelle ist bei Luft-Wärmepumpen die Temperatur der Umgebungsluft und bei Wasser-Wärmepumpen die Temperatur des Grundwassers.

In der Praxis misst die Jahresarbeitszahl (JAZ) die Effizienz einer Wärmepumpe über ein ganzes Jahr hinweg, wobei unterschiedliche Betriebsbedingungen und Heizanforderungen berücksichtigt werden. Die JAZ entspricht der jährliche Wärmeleistung der Wärmepumpe geteilt durch ihren jährlichen Stromverbrauch.

In dieser Analyse wird die JAZ für leistungsgeregelte Wärmepumpen im bivalent monoenergetischen Betrieb nach der Norm VDI 4650 Blatt 1 berechnet. Die Temperaturspreizung zwischen Vorlauf und Rücklauf des Heizungssystems beträgt hier 10 K und die Warmwassertemperatur beträgt 60°C. **Für dezentrales Heizen mit Wärmepumpen wird angenommen, dass diese sowohl für Raumheizung als auch für die Brauchwassererwärmung eingesetzt werden.** Werden Großwärmepumpen in Verbindung mit Wärmenetzen eingesetzt, entspricht die angenommene Temperaturspreizung zwischen dem Wärmenetz und der Vorlauftemperatur der Heizungsanlage ebenfalls 10 K.

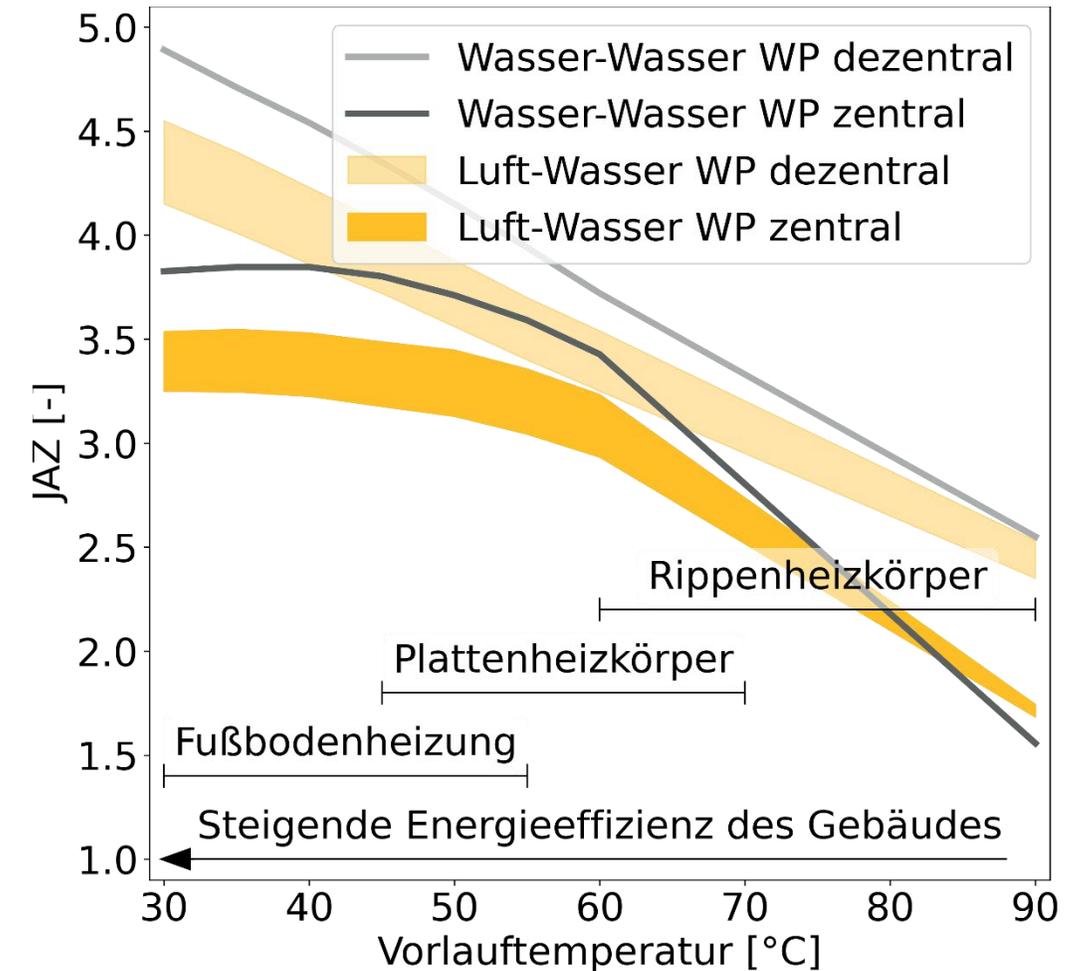
Ermittlung der Jahresarbeitszahl in Abhängigkeit der Vorlauftemperatur

Die Jahresarbeitszahl von Luft/Wasser-Wärmepumpen für dezentrales Heizen wird durch eine Spanne dargestellt, die auf deutschen Klimabedingungen basiert. Die Minimal- und Maximalwerte der Spanne werden mit Normaußentemperaturen von -8°C und -14°C berechnet.

Die Jahresarbeitszahl von Wasser/Wasser-Wärmepumpen für dezentrales Heizen wird unter der Annahme einer konstanten Grundwassertemperatur von 10°C berechnet. Für zentrales Heizen mit Wasser/Wasser-Wärmepumpen wird angenommen, dass die Brauchwassererwärmung über das Wärmenetz erfolgt. Ist die Brauchwassertemperatur höher als die Temperatur des Wärmenetzes abzüglich einer Temperaturdifferenz von 10 K, erfolgt die restliche Brauchwassererwärmung über einen Heizstab. Die JAZ ergibt sich aus dem über die Wärmemenge gewichteten Mittelwert der Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe und der Effizienz des Heizstabs.

Die Vorlauftemperatur eines Heizsystems hängt von der Wärmeaustauschfläche der Heizkörper und der Energieeffizienz des Gebäudes ab. Je größer die Fläche der Heizkörper ist, desto niedriger muss die Vorlauftemperatur sein, um die gleiche Wärmemenge in den Raum zu transportieren. Der Wärmebedarf eines Gebäudes sinkt, je besser es gedämmt ist. Sinkt der Energiebedarf des Gebäudes, während die Fläche der Heizkörper gleich bleibt, kann die Vorlauftemperatur gesenkt werden.

Jahresarbeitszahlen in Abhängigkeit von der Vorlauftemperatur



Zusammenhang zwischen der Jahresarbeitszahl von Wärmepumpen und der Vorlauftemperatur des Heizungssystems für verschiedene Wärmepumpensysteme nach VDI 4650 Blatt 1

Berechnung der Wärmegestehungskosten

Die Wärmegestehungskosten, oder levelized cost of heating (LCOH), sind eine Kennzahl, mit der die Kosten der Wärmeerzeugung aus verschiedenen Quellen oder Technologien über die gesamte Lebensdauer des Systems verglichen werden können. **Die Berechnung der LCOH hängt von einer Vielzahl von Parametern ab, die mittels der folgenden Formel verknüpft werden.** Für Parameter getroffene Annahmen sind im Anhang zu finden.

I = Investitions- und Installationskosten

r = Zinssatz

t = Wirtschaftliche Lebensdauer

$$LCOH = \frac{I r \frac{(1+r)^t}{(1+r)^t - 1}}{flh} + (p_{H_2} s + g) \left(1 + db \left(\frac{1}{\eta} - 1 \right) \right) + \frac{FOM}{flh}$$

flh sind die jährlichen Volllaststunden, also das Verhältnis von Jahresenergieverbrauch und installierter Leistung, skaliert auf 8760 Stunden.

p_{H_2} ist der Wasserstoffpreis.

s ist das Verhältnis der Preise des von der Heizung verwendeten Energieträgers und Wasserstoff. Bei einer Wärmepumpe beispielsweise das Verhältnis von Strom- und Wasserstoffpreis.

g sind die Netzentgelte für den von der Heizungsanlage genutzten Energieträger. Für Anlagen mit Gaskesseln oder Wärmepumpen werden bei dezentralen Anlagen die historischen Gas- bzw. Stromnetzentgelte für Haushalte und bei zentralen Anlagen die historischen Netzentgelte für Unternehmen verwendet. Für Wasserstoffkesselanlagen verwenden wir historische Gasnetzentgelte geteilt durch 0,8, um den Verlust an Transportkapazität darzustellen, wenn Erdgasnetze auf Wasserstoff umgerüstet werden.

db ist der Deckungsbeitrag des primären Wärmeerzeugers am Gesamtwärmebedarf. Für alle Technologien außer Luft-Wasser-Wärmepumpen ist dieser gleich eins.

η ist der energetische Wirkungsgrad des Heizsystems. Für Wärmepumpensysteme entspricht dieser der Jahresarbeitszahl.

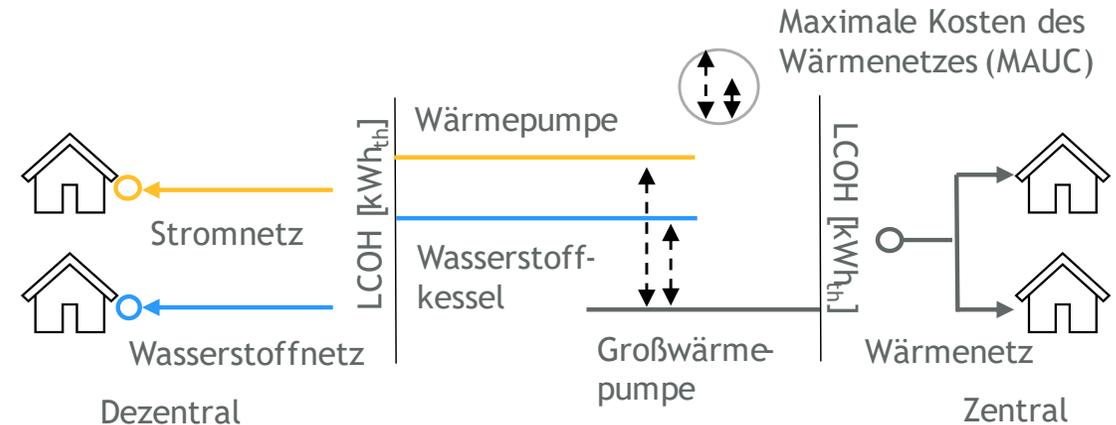
FOM sind die fixen Betriebs- und Wartungskosten der Heizungsanlage.

Wie viel darf die zukünftige Infrastruktur kosten?

Die LCOH verschiedener Heizungssysteme erlauben grundsätzlich einen Kostenvergleich der Technologien. Bei vielen Technologieoptionen lassen sich aber über einige Kostenbestandteile nur unzureichende Aussagen treffen, beispielsweise die Kosten neuer Wasserstoff- oder Wärmenetze. Der Vergleich der LCOH verschiedener Heizungssysteme sollte also so verstanden werden, dass er Aussagen über die maximal erlaubten zusätzlichen unbekannteten Kosten, *maximal additional unknown cost (MAUC)*, erlaubt.

Wir unterscheiden zwischen der dezentralen Wärmeerzeugung und der zentralen Wärmeerzeugung. Bei ersterer besitzt jedes Gebäude eine eigene Heizung, bei letzterer wird die Wärme für mehrere Gebäude in einer Wärmezentrale erzeugt und über ein Wärmenetz an die Gebäude verteilt.

Aus der Kostendifferenz zwischen zentralen und dezentralen Heizungssystemen lässt sich bestimmen, wie hoch die Kosten für ein Wärmenetz maximal sein dürfen, bevor die dezentrale Wärmeerzeugung wirtschaftlicher wäre. Für die dezentrale Wärmeversorgung betrachten wir Luft-Luft-Wärmepumpen und Wasserstoffkessel, für die zentrale Wärmeversorgung Luft-Wasser- und Wasser-Wasser-Wärmepumpen. Aufgrund ihrer Kostenstruktur sind zentrale Wasserstoffkessel und dezentrale Wasser-Wasser-Wärmepumpen meist unwirtschaftlich.



Schematische Darstellung der MAUC des Wärmenetzes

Vergleich von zentraler Großwärmepumpe mit dezentralen Wasserstoffkesseln: Die Technologien beziehen ihre Energie aus unterschiedlichen Netzen. Angenommen, die Netzentgelte für Wasserstoff entsprechen den historischen Gasnetzentgelten für Haushalte korrigiert um die verringerte Transportkapazität von Wasserstoff und die Stromnetzentgelte entsprechen den historischen Netzentgelten für Haushalte. Dann zeigt die Kostenlücke (Pfeile) an, wie hoch die Netzkosten für das Wärmenetz maximal sein dürfen.

3. Zieltechnologien in beispielhaften Fokusgebieten

3.1 Identifikation von Beispielgebieten

3.2 Vergleich der MAUC

3.3 Kernaussagen

Praktische Anwendung der MAUC durch Beispielgebiete

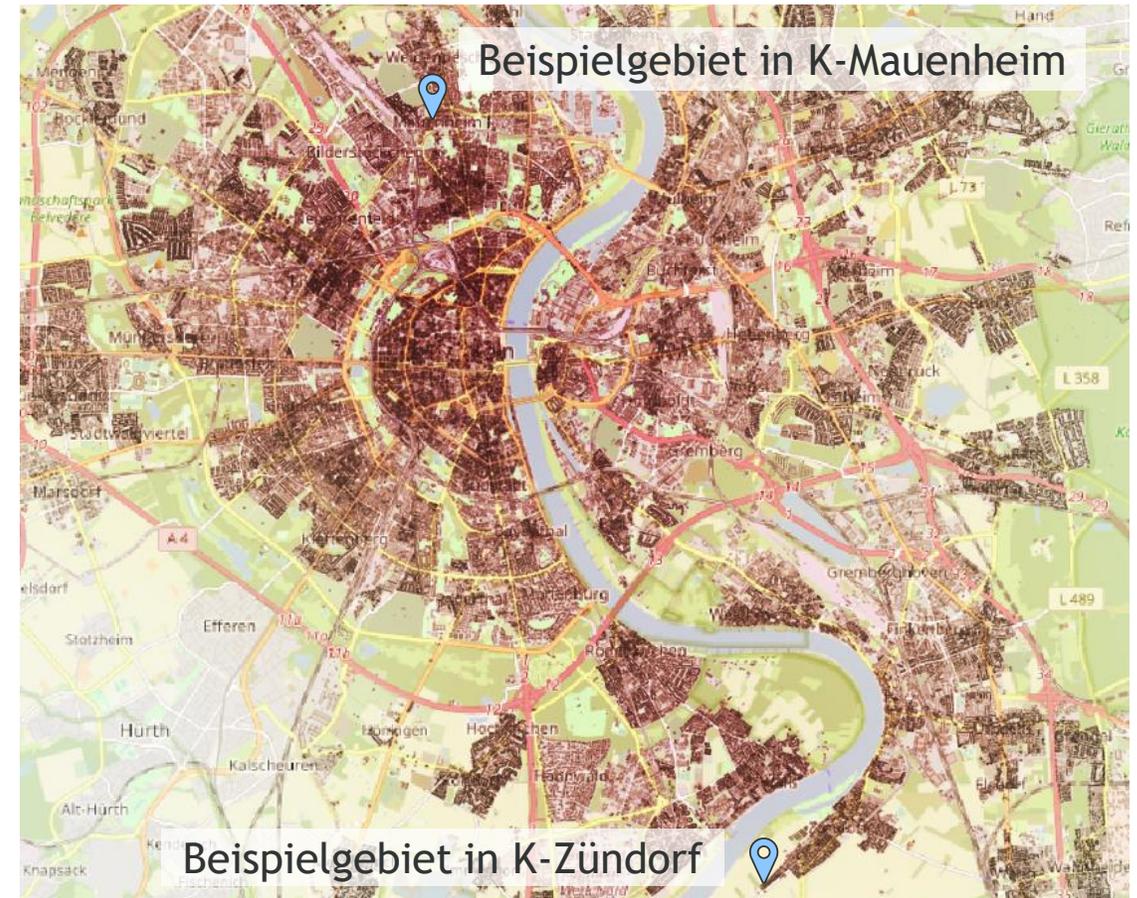
Die Wärmewende ist stark von regionalen Charakteristika geprägt. Um das Konzept der MAUC greifbar zu machen, untersucht diese Analyse exemplarisch zwei Gebiete im Großraum Köln mit dem Ziel, die kostengünstigste Technologie für jedes Haus bzw. für die Zusammenfassung mehrerer Häuser zu erörtern.

Im Sinne einer zukunftsgerichteten Perspektive, in der höhere Energieeffizienzstandards die Norm darstellen (EU-Rat, 2023), neben wir die Anhebung aller Gebäude auf den KFW-50-Energiestandard vorgenommen worden.

Als Datengrundlage für die Identifikation von Beispielgebieten dienen neben Informationen zur städtebaulichen Struktur (OpenStreetMap, 2023; Stadt Köln, 2023a) Informationen hinsichtlich der Hausumringe, Gebäudetypologie und Endenergiebedarfe aus dem Projekt SimStadt 2.0 (2021). Mittels dieser haben wir eine Wärmebedarfskarte der Stadt Köln erstellt.

Im zweiten Schritt erfolgte systematisch die Ermittlung unterschiedlicher Siedlungsstrukturen anhand vorgegebener Rahmenparameter wie dem Anteil von Ein- und Mehrfamilienhäusern, der Eigentumsstruktur sowie der aktuellen Beheizungsstruktur. Das Ziel war die Identifikation von repräsentativen städtischen, vorstädtischen bzw. dörflichen Gebieten mit einer möglichst breiten Datenbasis. Auf dieser Grundlage haben wir für den urbanen Siedlungstyp eine Blockrandbebauung im Stadtteil Mauenheim und für den suburbanen bzw. dörflichen Siedlungstyp eine lockere, offene Bebauung am Ortsrand von Zündorf als Beispielgebiete ausgewählt.

Wärmebedarfskarte der Stadt Köln



Eigene Darstellung auf Basis der Datengrundlage von © OpenStreetMap (2023), SimStadt 2.0 (2021), Stadt Köln (2023a) und dem Wärmekataster NRW (2023). Die ausgewählten Beispielgebiete sind durch Markierungen gekennzeichnet.

Verschiedene Siedlungstypen im Fokus

Lockere, offene Bebauung am Ortsrand

Das Beispielgebiet in Zündorf ist **dörflich geprägt** und weist eine **heterogene Eigentümerstruktur** auf. Der Gebäudebestand setzt sich aus Ein-, Zwei- und Mehrfamilienhäusern zusammen, wobei die Einfamilien- und Reihenhäuser mit einem gemeinsamen Anteil von mehr als 80% überwiegen und der Großteil der Häuser zwischen den 1960er und 1980er Jahren errichtet wurde (SimStadt 2.0, 2021). Die vorherrschende Wärmeinfrastruktur besteht aus Gasheizungen, welche mitunter durch Einzelfeuerstätten und dezentrale Lösungen ergänzt werden (Stadt Köln, 2023b).



Quelle: Google Street View (2023) - Köln Zündorf, Loorstraße.

Blockrandbebauung im Urbanen Raum



Quelle: Google Street View (2023) - Köln Mauenheim, Ortweinstr.

Der betrachtete Häuserblock im Stadtteil Mauenheim befindet sich im Eigentum der Genossenschaft GWG zu Köln und zeichnet sich durch einen **besteht aus Mehrfamilienhäusern, über 80% davon mit mehr als 6 Wohnungen**. Die Baujahre der Gebäude liegen zwischen den 1930er Jahren und 2019, wobei der energetische Standard nach erfolgten Modernisierungsmaßnahmen mindestens dem KfW-100-Standard entspricht. Gasetagenheizungen sowie kleine Heizzentralen mit zentraler Warmwasserversorgung sind Teil der heutigen Heizungsinfrastruktur (GWG zu Köln, 2023).

Rahmenparameter der Beispielgebiete

		Beispielgebiet Zündorf	Beispielgebiet Mauenheim
Heizlast des Gebiets	[kW]	740	550
Durchschnittliche Heizlast pro Gebäude	[kW/Gebäude]	7	31
Beheizte Fläche pro Gebäude	[m ² /Gebäude]	110	550
Beheizte Fläche pro Haushalt	[m ² /Haushalt]	110	70
Haushalte pro Gebäude	[Haushalte/Gebäude]	1	8
Siedlungstyp	[-]	Lockere Bebauung aus Ein- und Mehrfamilienhäusern	Blockrandbebauung

Weitere Parameter für die Berechnungen befinden sich im Anhang.

LCOH im dörflichen Raum am Beispiel von Köln-Zündorf

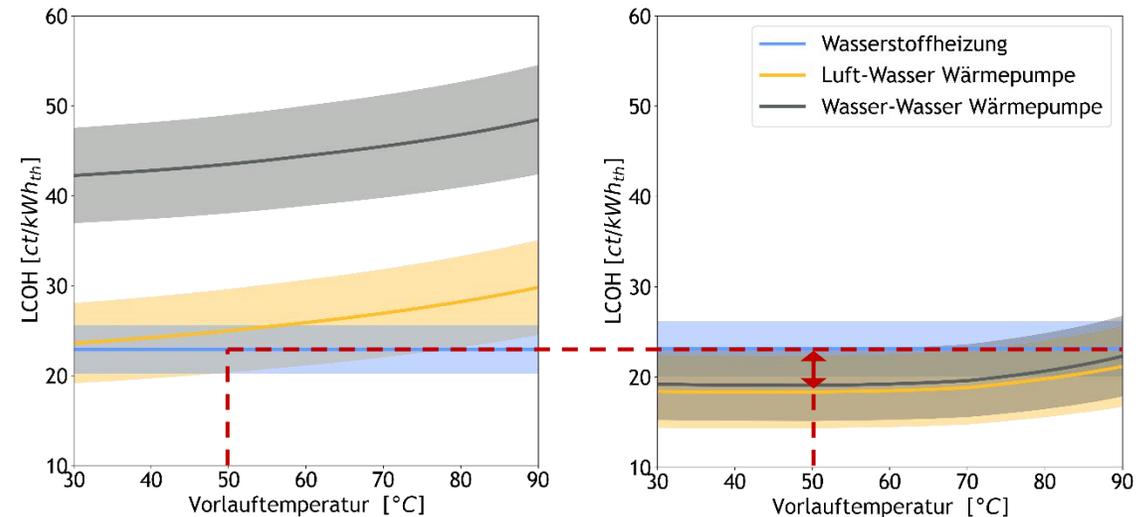
Die Abbildungen auf dieser und der nächsten Seite zeigen die LCOH von zentralen und dezentralen Heizsystemen im Beispielgebiet Köln-Zündorf für einen Wasserstoffpreis von 100 EUR/MWh und 200 EUR/MWh in **Abhängigkeit von der Vorlauftemperatur**. Die Unterabbildung auf der linken Seite zeigt die dezentralen Heiztechnologien, die rechte Unterabbildung die zentralen.

Der schraffierte Bereich der LCOH jeder Heiztechnologie durch eine farbige Fläche gekennzeichnet. Die **Kostenspanne basiert auf Spannen bzgl. der Einflussparameter**, also des Faktors zwischen Strom- und Wasserstoffpreis, der Investitionskosten und für die Vollaststunden der Heiztechnologien. Die Linie in der Mitte eines farbigen Bereichs stellt die durchschnittlichen LCOH dar.

Aus den Grafiken lassen sich folgende Zusammenhänge erkennen:

- Die LCOH von wärmepumpenbasierten Heizungstechnologien **sinken mit sinkender Vorlauftemperatur, da der COP zunimmt**.
- Bei Wasserstoffheizungen bringt zentrale Wärmeerzeugung keine Kosteneinsparungen. Deshalb sind **wasserstoffbetriebene Wärmenetze nicht wirtschaftlich**. Der Grund dafür ist, dass Skaleneffekte bei Wasserstoffkesseln gering ausfallen und durch die Kosten von Wärmeübergabestationen ausgeglichen werden, welche bei zentraler Wärmeversorgung notwendig sind.

Kostenvergleich bei einem Wasserstoffpreis von 100 EUR/MWh



Die rote Linie zeigt das Niveau der LCOH einer dezentralen Wasserstoffheizung bei einer Vorlauftemperatur von 50°C. Der rote Doppelpfeil markiert die Differenz zwischen diesen Kosten und der zentralen Wärmeversorgung mit einer Wasserstoffheizung. Bei einem Wasserstoffpreis von 100 EUR/MWh betragen die MAUC des Wärmenetzes 3,9 ct/kW_{th}. Dies entspricht 80% typischer Wärmenetzentgelte im Siedlungstyp „lockere Bebauung“. In diesem Fall wäre dezentrale Wärmeerzeugung mit Wasserstoff möglicherweise günstiger als zentrale Wärmeerzeugung über wärmepumpen-betriebene Wärmenetze.

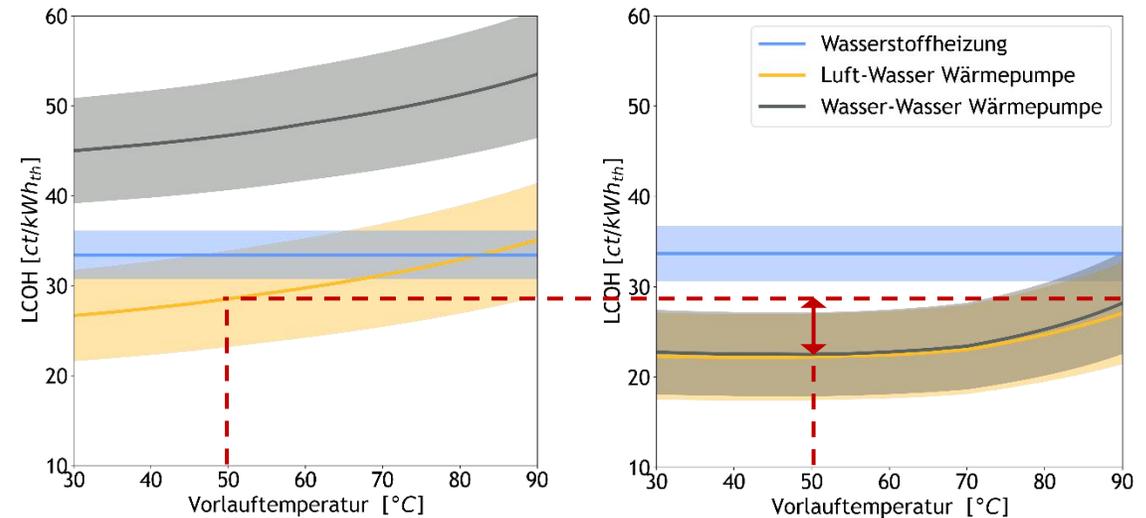
LCOH im dörflichen Raum am Beispiel von Köln-Zündorf

- Die LCOH von zentralen wärmepumpenbasierten Heizsystemen **liegen deutlich unterhalb** den LCOH von dezentralen Wärmepumpensystem. Der Grund hierfür sind signifikante Reduktion der Investitionskosten von Wärmepumpen durch **Skaleneffekte**.
- Die LCOH von **Wasser-Wasser Wärmepumpen** liegen bei der dezentralen Wärmeerzeugung aufgrund hoher Kosten für die Bohrung eines Grundwasserbrunnens deutlich über den LCOH von Luft-Luft Wärmepumpen. Aufgrund von **Skaleneffekten** gleichen sich die LCOH beider Technologien in der zentralen Wärmeversorgung an.

Bei niedrigen Wasserstoffpreisen von 100 EUR/MWh zeigen die MAUC als Differenz zwischen den Kosten der zentralen und dezentralen Wärmeerzeugung, dass dezentrale Wasserstoffheizungen bei Vorlauftemperaturen von 50°C wirtschaftlicher sein können als zentrale wärmepumpenbasierte Heizsysteme. Diese Vorlauftemperatur entspricht Häusern mit moderater Energieeffizienz und Fußbodenheizung oder hoher Energieeffizienz und Plattenheizkörpern. Bei moderaten Wasserstoffkosten von 200 EUR/MWh sind Wärmepumpenlösungen vermutlich wirtschaftlicher.

Die effiziente Zieltechnologie hängt demnach maßgeblich vom Wasserstoffpreis ab.

Kostenvergleich bei einem Wasserstoffpreis von 200 EUR/MWh



Bei einem Wasserstoffpreis von 200 EUR/MWh sind Luft-Wasser Wärmepumpen die günstigste dezentrale Technologie. Die rote Linie zeigt das Niveau der LCOH dieser bei einer Vorlauftemperatur von 50°C. Der rote Doppelpfeil markiert die Differenz zwischen diesen Kosten und der zentralen Wärmeversorgung mit einer Luft-Wasser Wärmepumpe. Die LCOH der zentralen Großwärmepumpe sind 7,3 ct/kW_{th} geringer, dies sind die MAUC des Wärmenetzes. Dies entspricht 170% typischer Wärmenetzentgelte im Siedlungstyp „lockere Bebauung“. Die Zentrale Versorgung über wärmepumpenbetriebene Wärmenetze ist wahrscheinlich die günstigste Option.

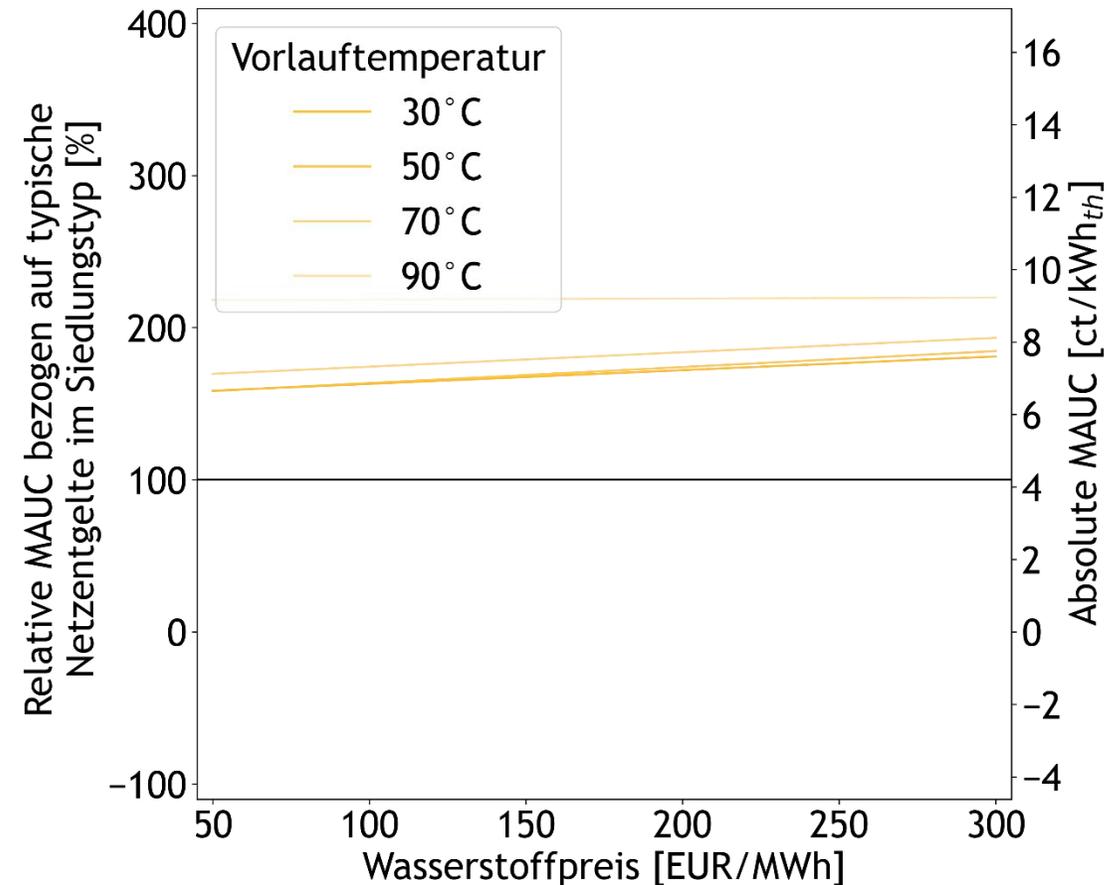
Wärmenetze sind auch bei lockerer Bebauung eine wirtschaftliche Option

Dadurch, dass Strompreis und Wasserstoffpreis zukünftig verknüpft sind, hängen auch die Wärmegestehungskosten von Wärmepumpensystemen von der unsicheren Entwicklung des Wasserstoffpreises ab. Die Berechnungen der Wärmegestehungskosten haben gezeigt, dass ebenso die MAUC einer zentralen Lösung gegenüber einer dezentralen Lösung vom Wasserstoffpreis abhängen.

Im Beispielgebiet Köln-Zündorf zeigt sich, dass die MAUC über alle untersuchten Wasserstoffpreis- und Vorlauftemperaturbereiche **deutlich oberhalb historischer Wärmenetzkosten** liegen.

Die MAUC des zentralen Wärmepumpensystems lässt darauf schließen, dass im direkten Vergleich von dezentralen und zentralen Wärmepumpensystemen die **zentrale Lösung in diesem dörflichen Gebiet die effizientere Zieltechnologie ist.**

Durchschnittliche MAUC: Zentrale Großwärmepumpe gegenüber dezentralen Luft-Wasser Wärmepumpen



Eigene Darstellung

Im städtischen Raum sind Wärmegestehungskosten geringer

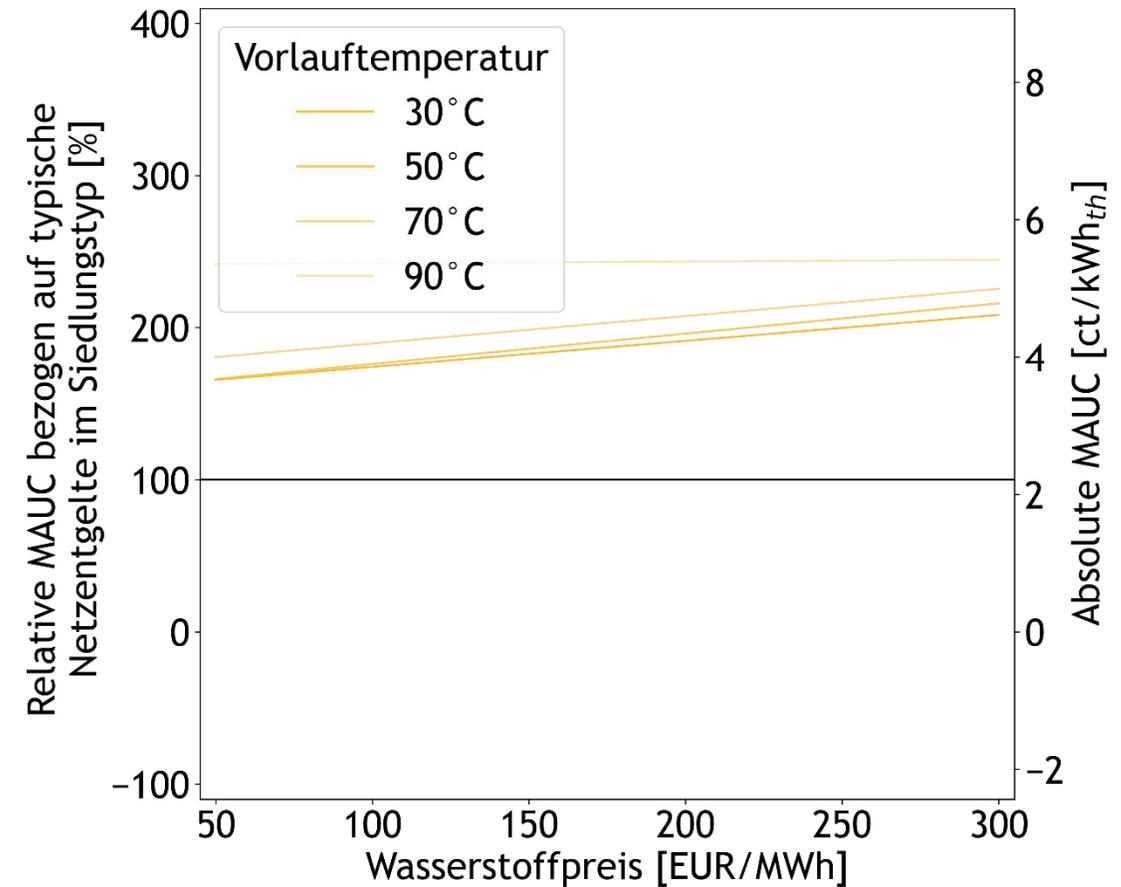
Vergleicht man ein mit einer Wärmepumpe versorgte Wärmenetz im städtischen Gebiet mit dezentralen Luft-Wasser Wärmepumpen am Beispiel eines Häuserblocks in Köln-Mauenheim, zeigen sich ähnliche Ergebnisse.

Im Vergleich zum dörflichen Raum fallen die absoluten MAUC des Wärmenetzes dabei geringer aus. Die einzelnen Gebäudeabschnitte des Beispielgebiets sind Mehrfamilienhäuser, welche über Zentralheizungen verfügen. **Die dezentralen Luft-Wasser Wärmepumpen sind daher größer als im dörflichen Gebiet.** Aufgrund von Skaleneffekten sinken somit ihre LCOH im Vergleich zum dörflichen Gebiet.

In Städten sind aufgrund der höheren Wärmedichte jedoch auch **die Wärmenetzkosten geringer**. Außerdem wird je Mehrfamilienhaus nur eine Wärmeübergabestation gebraucht, dadurch sinken die Investitionskosten bei zentraler Wärmeerzeugung. Vergleicht man die MAUC des Wärmenetzes mit typischen Wärmenetzentgelten in Gebieten mit Wohnblöcken, zeigt sich ein ähnliches Ergebnis wie im dörflichen Gebiet:

Die MAUC des Wärmenetzes liegen mindestens 70% über den typischen Wärmenetzentgelten in Gebieten mit Wohnblöcken, unabhängig von der Energieeffizienz und den Heizkörpern der versorgten Gebäude.

Durchschnittliche MAUC: Zentrale Großwärmepumpe gegenüber dezentralen Luft-Wasser Wärmepumpen



Eigene Darstellung

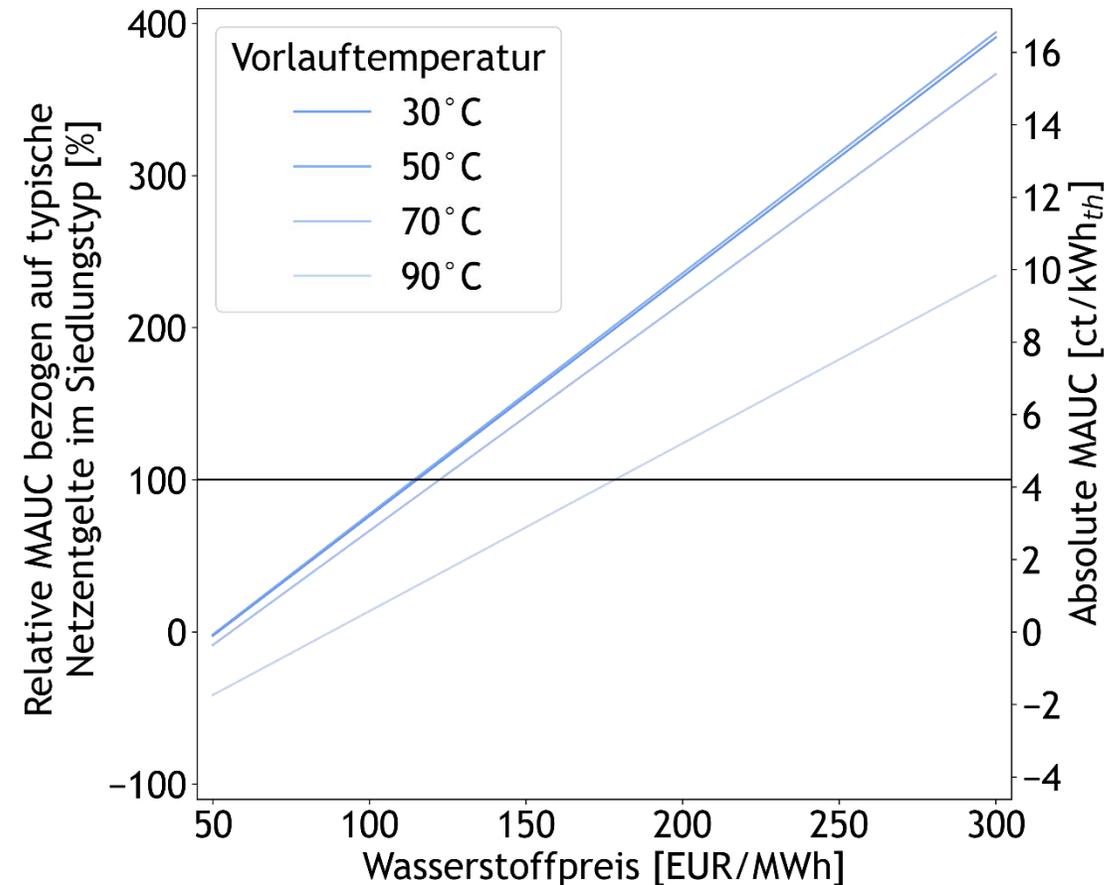
Wärmenetze sind bei besseren Dämmstandards kostengünstiger

Nicht nur zentrale Großwärmepumpen sind Alternativen zu dezentralen Wärmepumpensystemen, sondern auch dezentrale Wasserstoffkessel. Berechnet man hier die MAUC des Wärmenetzes, **zeigt sich ein signifikanter Anstieg mit steigendem Wasserstoffpreis**. Dies hängt damit zusammen, dass der Wasserstoffpreis die LCOH von Wasserstoffkesseln stärker beeinflusst als die LCOH von Wärmepumpen.

Bei Vorlauftemperaturen von 90°C zeigt sich eine deutliche Auswirkung der Vorlauftemperatur auf die MAUC. **Die MAUC sind bei hohen Vorlauftemperaturen aufgrund einer niedrigeren JAZ niedriger, das heißt, bei hohen Vorlauftemperaturen dürfte die Wärmenetzinfrastruktur weniger kosten.** Zwischen 70°C und 30°C nehmen die Änderungen der JAZ über die Vorlauftemperatur ab. Daher werden die MAUC bei niedrigeren Vorlauftemperaturen weniger von durch diese beeinflusst.

Bei einem Wasserstoffpreis von etwa 110 EUR/MWh und Vorlauftemperaturen zwischen 30 und 70 °C entsprechen die MAUC den typischen **den typischen Netzentgelten in einer lockeren Bebauung** aus Ein- und Mehrfamilienhäusern. Das heißt, wenn der erwartete langfristige Wasserstoffpreis unter 110 EUR/MWh liegt, ist eine dezentrale Heizung mit Wasserstoffkesseln im Durchschnitt wirtschaftlicher als ein mit Wärmepumpen betriebenes Wärmenetz - vorausgesetzt, die Netzkosten liegen auf dem Niveau der historischen Gasnetzentgelte für Haushalte.

Durchschnittliche MAUC: Zentrale Großwärmepumpe gegenüber dezentralen Wasserstoffkesseln



Eigene Darstellung

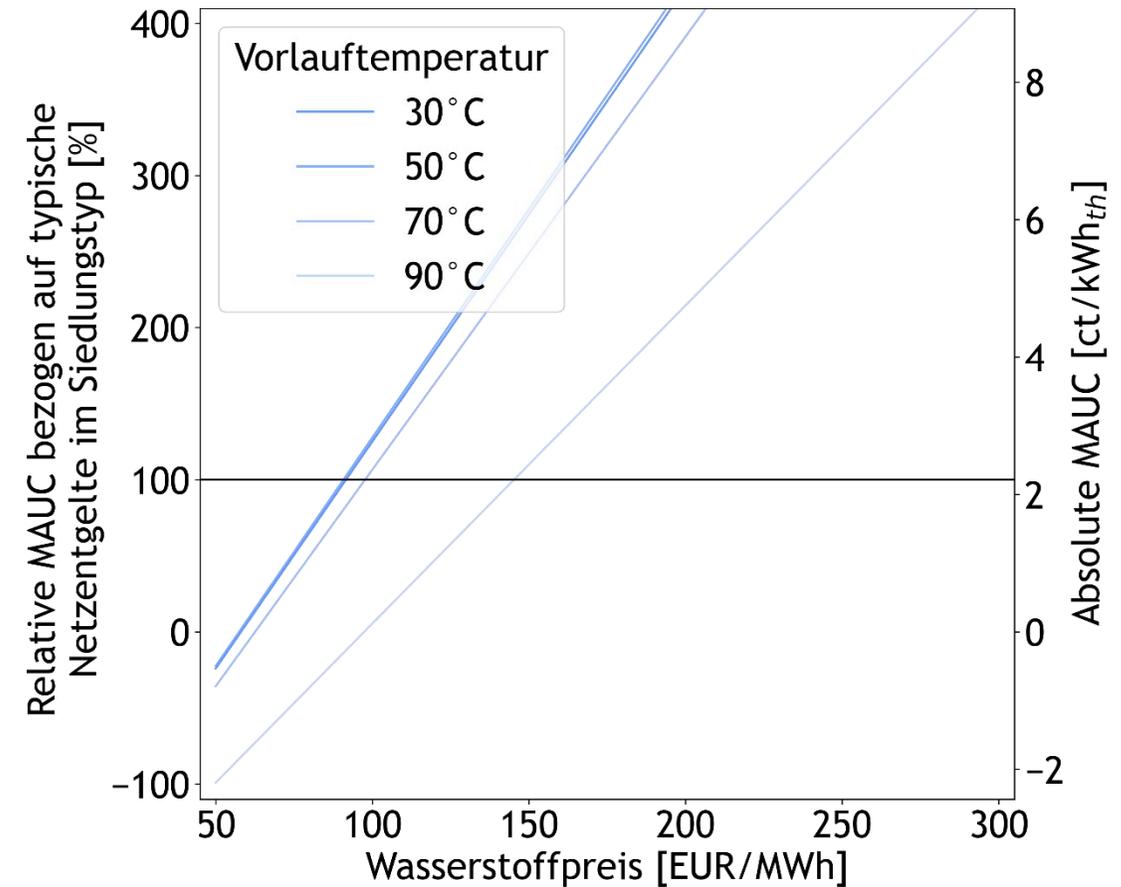
Nur bei niedrigen Wasserstoffkosten sind dezentrale Heizsysteme wirtschaftlich

Liegen die zu erwartenden Wasserstoffkosten über 110 EUR/MWh, so ist **zentrales Heizen über ein wärmepumpenbetriebenes Wärmenetz im Durchschnitt wirtschaftlicher als dezentrales Heizen mit Wasserstoff**. Dies gilt in dörflichen Gebieten und für Häuser mit relativ geringer Energieeffizienz und kleinen Heizkörpern. Bei Häusern mit sehr niedriger Energieeffizienz sind die LCOH von wärmepumpenbetriebenen Wärmenetzen in Dörfern und dezentraler Heizung mit Wasserstoff bei einem Wasserstoffpreis von 150 EUR/MWh gleich.

Im städtischen Raum sind im Vergleich zum ländlichen Raum die MAUC des Wärmenetzes sensitiver auf den Wasserstoffpreis. Für die meisten Gebäude liegt die **Kostenparität zwischen dem wärmepumpenbetriebenen Wärmenetz und dezentralen Heizen mit Wasserstoff bei einem Wasserstoffpreis von circa 90 EUR/MWh** vor. Nur für Gebäude mit sehr niedrigen Energieeffizienzstandard und Rippenheizkörpern (also einer Vorlauftemperatur von 90°C) liegt die Kostenparität bei 140 EUR/MWh vor.

Bei Wasserstoffkosten über 140 EUR/MWh und moderaten Energieeffizienzstandards mit Vorlauftemperaturen von 50° C oder darunter liegen die MAUC deutlich über historischen Wärmenetzkosten. **Das heißt, dass hier auch bei einer Vervielfachung der Netzentgelte Wärmenetze mit Großwärmepumpen wirtschaftlicher wären.**

Durchschnittliche MAUC: Zentrale Großwärmepumpe gegenüber dezentralen Wasserstoffkesseln



Eigene Darstellung

Kernaussagen

Die langfristig effiziente Infrastrukturplanung hängt von Erwartungen bezüglich der **Entwicklung des Wasserstoffpreises** ab. Dies liegt zum einen am zukünftigen Einsatz von Wasserstoff in der Stromerzeugung und zum anderen an der grundsätzlichen Möglichkeit, Wasserstoff in der Wärmeerzeugung direkt zu nutzen. **Oft sind Wärmepumpen eine zentrale Dekarbonisierungsoption.** Werden diese installiert, lohnen sich auf Grund von Skaleneffekten vielerorts **Großwärmepumpen in Verbindung mit Wärmenetzen.**

Wasserstoffheizungen hingegen können nur dann wirtschaftlich sein, wenn für den Gebäudesektor Wasserstoff in ausreichenden Mengen zu Preisen um 100 EUR/MWh oder darunter zu Verfügung steht. Die Wärmegegestehungskosten von Wasserstoffheizungen sind dabei in deutlich größerem Ausmaß mit dem Wasserstoffpreis und den **assoziierten Risiken** verbunden als die von Wärmepumpen.

Datengrundlage und Literaturverzeichnis

Ariadne (2023)	<u>Analyse: Wandel der Fernwärme im Kontext des Kohleausstiegs und der aktuellen Gaskrise</u>
Bartels (2009)	<u>Cost Efficient Expansion of District Heat Networks in Germany</u>
Buderus (2022)	<u>Katalog 2022</u>
Bundesnetzagentur (2023)	<u>Netzentgeld (Strom und Gas)</u>
BMWK (2023)	<u>Startschuss fürs Heizen mit erneuerbaren Energien - Bundestag beschließt Novelle des Gebäudeenergiegesetzes</u>
dena (2023)	<u>Vernetzte Wärmeversorgung in Bestandsquartieren - Handlungsstrategien für Anwendungsfälle für die Initiierung, Planung und Umsetzung vor Ort</u>
Destatis (2023)	<u>Wohnen in Deutschland - Zusatzprogramm Wohnen des Mikrozensus 2022</u>
Elco (2023)	Preisliste 2023
EU-Rat	<u>Fit für 55: umweltfreundlichere Gebäude</u>
EWI (2021)	<u>dena-Leitstudie Aufbruch Klimaneutralität. Klimaneutralität 2045 - Transformation der Verbrauchssektoren und des Energiesystems. Herausgegeben von der Deutschen Energie-Agentur GmbH (dena).</u>
EWI (2022)	<u>Vergleich der „Big 5“- Klimaneutralitätsszenarien</u>
GEG-Novelle (2023)	<u>Novelle des Gebäudeenergiegesetzes auf einen Blick (GEG)</u>
GesEntw WPG (Kabinettsfassung)	<u>Gesetzentwurf der Bundesregierung: Entwurf eines Gesetzes für die Wärmeplanung und zur Dekarbonisierung der Wärmenetze</u>
GWG zu Köln (2023)	<u>Unser Bestand in Mauenheim</u>

Datengrundlage und Literaturverzeichnis

Koalitionsvertrag (2021)	<u>Koalitionsvertrag 2021 zwischen SPD, Bündnis 90/Die Grünen und FDP, Mehr Fortschritt wagen</u>
Moritz & Bramer (2023)	Experteninterview
nPro (2023)	<u>Planning tool for buildings & districts</u>
OpenStreetMap (2023)	<u>© OpenStreetMap</u>
SimStadt 2.0 (2021)	<u>EnEff:Stadt - SimStadt 2.0 : Schlussbericht.</u>
Stadt Köln (2023a)	<u>Offene Daten Köln - Geodaten, Infrastruktur, Bauen und Wohnen</u>
Stadt Köln (2023b)	<u>Gasverteilnetz Karte</u>
UBA - Umweltbundesamt (2023)	<u>Energieverbrauch nach Energieträgern und Sektoren</u>
Vaillant (2023)	Preisliste Gesamtprogramm
Viessmann (2023)	<u>Preisliste 2023</u>
Wärmekataster NRW (2023)	<u>Datenkatalog zum Wärmekataster NRW</u>
Winter et al. (2001)	<u>Untersuchung der Gleichzeitigkeit in kleinen und mittleren Nahwärmenetzen</u>

Abkürzungsverzeichnis

BMWK	Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz
FOM	Fixkosten für Betrieb und Wartung
GEG	Gebäudeenergiegesetz
GesEntw	Gesetzentwurf
H ₂	Wasserstoff
JAZ	Jahresarbeitszahl
kWh/kWh _{th}	Kilowattstunde/Kilowattstunde thermisch
LCOH	Levelized Cost of Heat, Wärmegestehungskosten
MAUC	Maximal additional unknown cost
MWh	Megawattstunde
TWh	Terrawattstunde
WP	Wärmepumpe
WPG	Wärmeplanungsgesetz

**Energiewirtschaftliches Institut an der
Universität zu Köln gGmbH (EWI)**

Alte Wagenfabrik
Vogelsanger Straße 321a
50827 Köln

 +49 (0)221 650 853-60

 <https://www.ewi.uni-koeln.de>

 @ewi_koeln

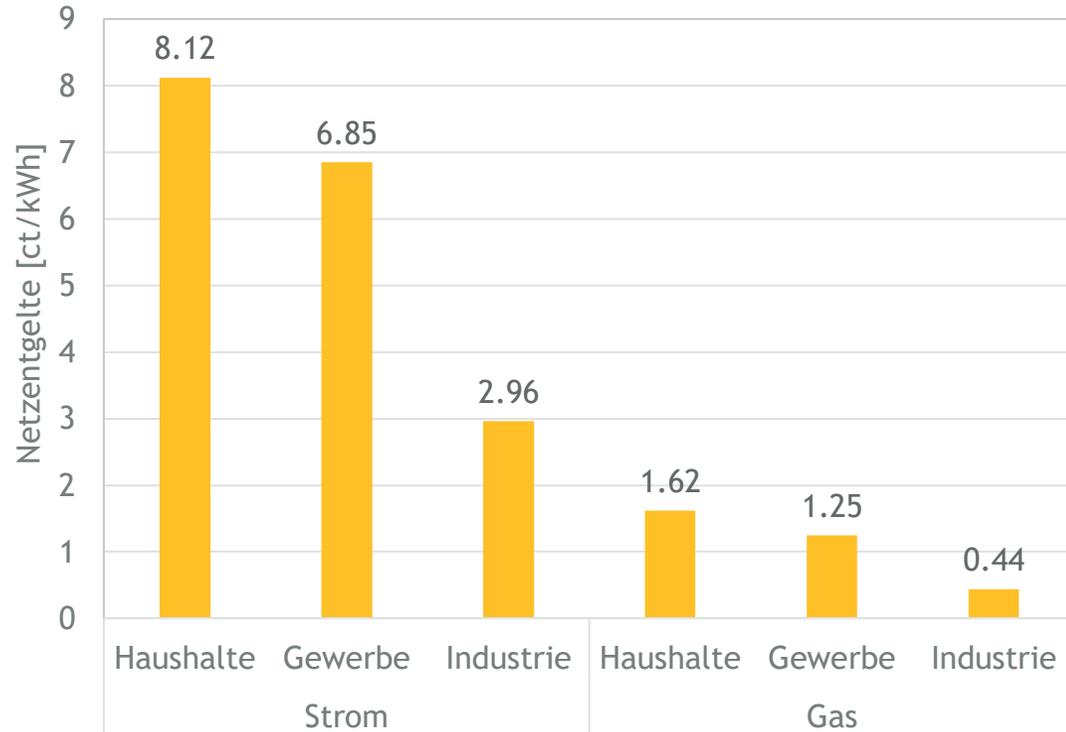
 EWI - Energiewirtschaftliches
Institut an der Universität zu Köln

Das Energiewirtschaftliche Institut an der Universität zu Köln (EWI) ist eine gemeinnützige GmbH, die sich der anwendungsnahen Forschung in der Energieökonomik und Energie-Wirtschaftsinformatik widmet und Beratungsprojekte für Wirtschaft, Politik und Gesellschaft durchführt. Annette Becker und Prof. Dr. Marc Oliver Bettzüge bilden die Institutsleitung und führen ein Team von mehr als 40 Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern. Das EWI ist eine Forschungseinrichtung der Kölner Universitätsstiftung. Neben den Einnahmen aus Forschungsprojekten, Analysen und Gutachten für öffentliche und private Auftraggeber wird der wissenschaftliche Betrieb finanziert durch eine institutionelle Förderung des Ministeriums für Wirtschaft, Innovation, Digitalisierung und Energie des Landes Nordrhein-Westfalen (MWIDE). Die Haftung für Folgeschäden, insbesondere für entgangenen Gewinn oder den Ersatz von Schäden Dritter, ist ausgeschlossen.

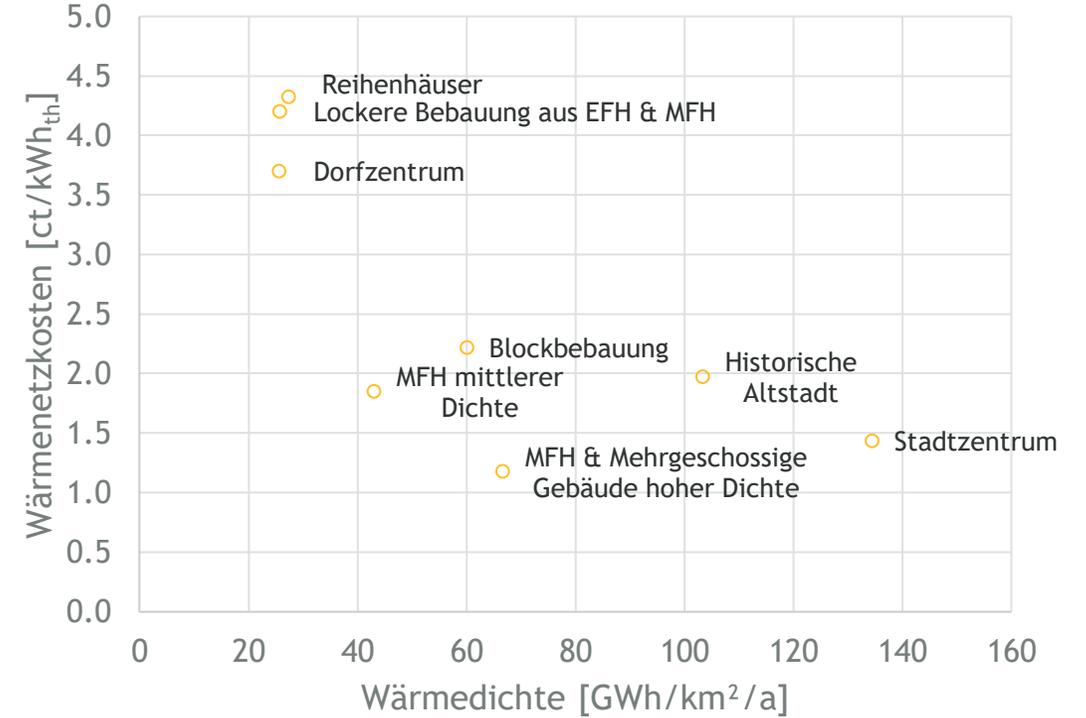
Anhang I

Durchschnittliche Gas- und Stromnetzentgelte in Deutschland in 2022

Referenzwerte für typische Wärmenetzentgelte nach Siedlungstyp



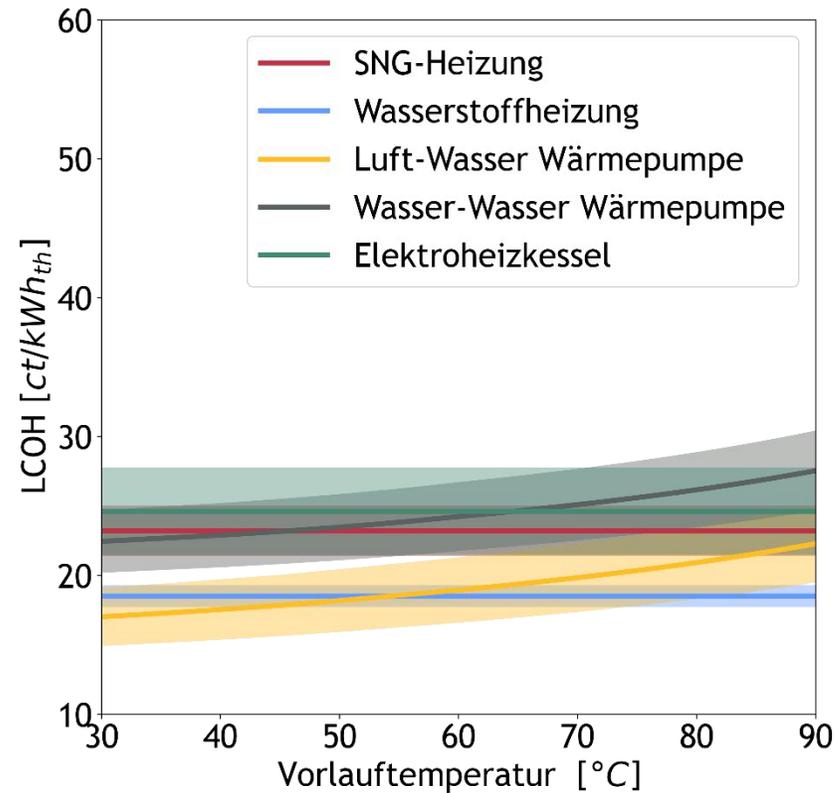
Quelle: Bundesnetzagentur (2023).



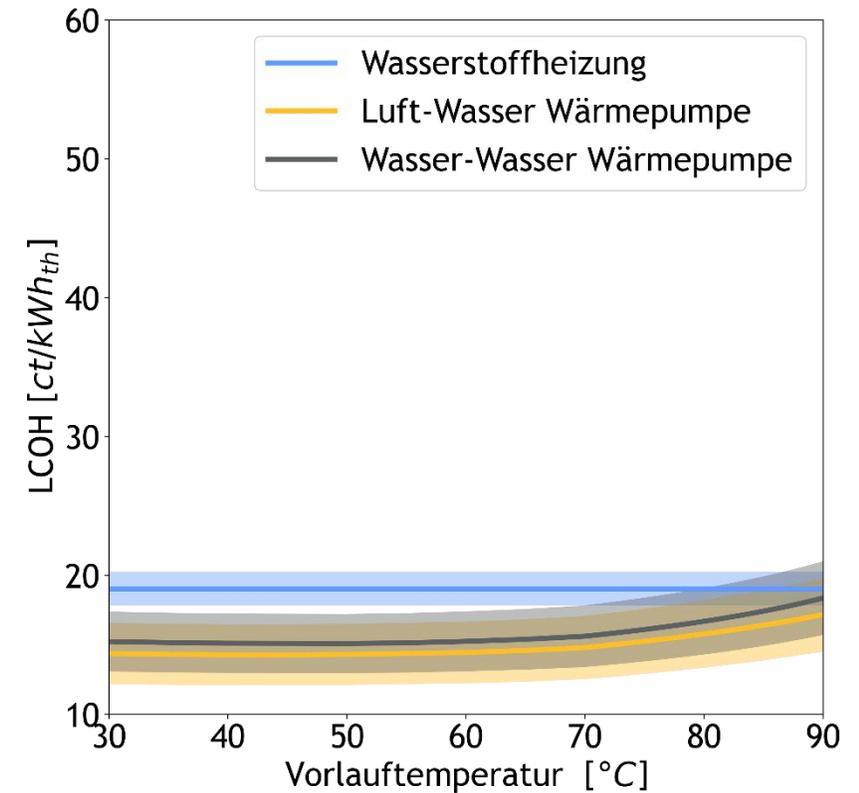
Quelle: Bartels (2009).

Anhang II - Wärmegestehungskosten im Beispielgebiet in Köln-Mauenheim

Dezentrales Heizen bei einem Wasserstoffpreis von 100 EUR/MWh



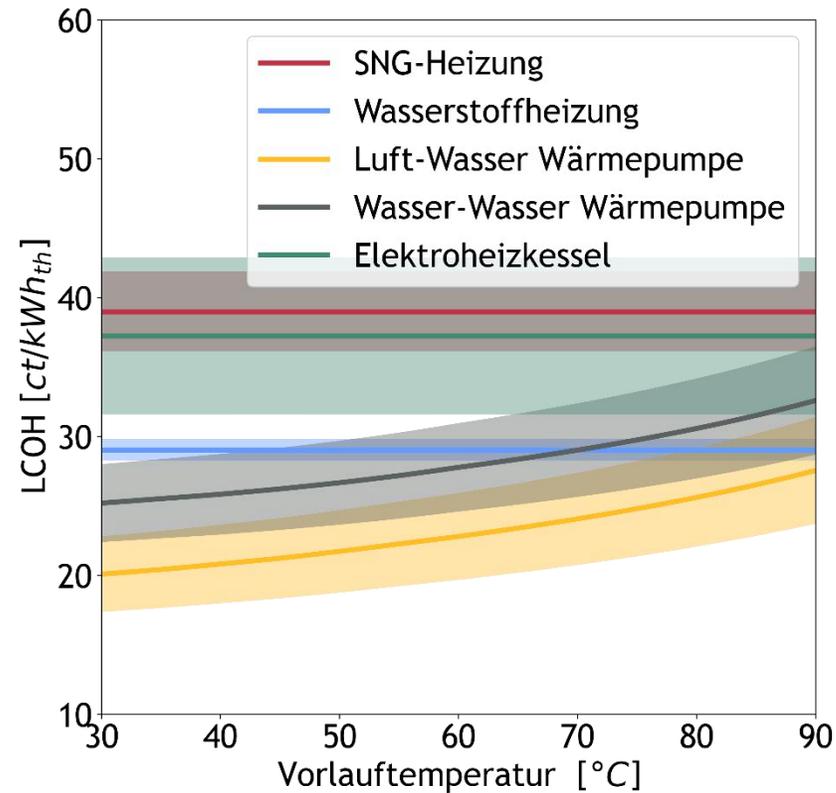
Zentrales Heizen bei einem Wasserstoffpreis von 100 EUR/MWh



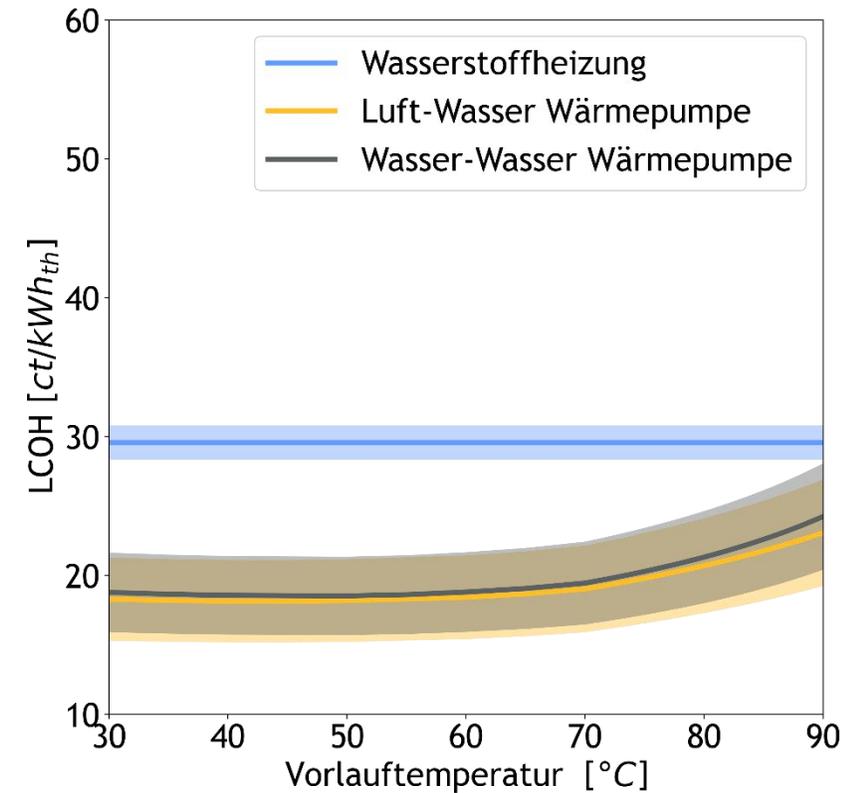
Quelle: Eigene Darstellung.

Anhang III - Wärmegestehungskosten im Beispielgebiet in Köln-Mauenheim

Dezentrales Heizen bei einem Wasserstoffpreis von 200 EUR/MWh



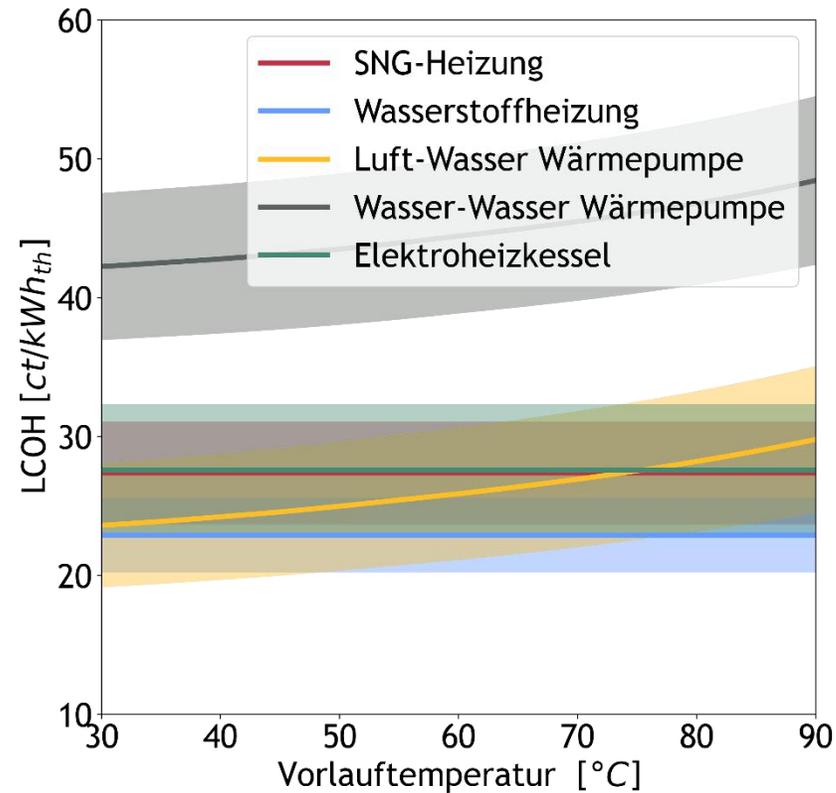
Zentrales Heizen bei einem Wasserstoffpreis von 200 EUR/MWh



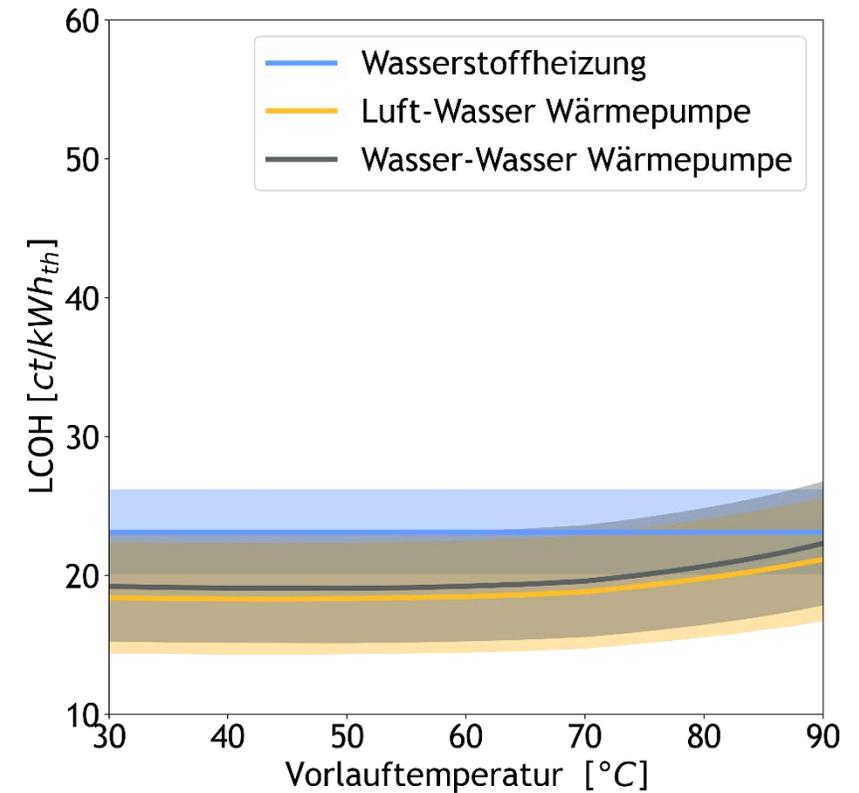
Quelle: Eigene Darstellung.

Anhang IV - Wärmegestehungskosten im Beispielgebiet in Zündorf

Dezentrales Heizen bei einem Wasserstoffpreis von 100 EUR/MWh



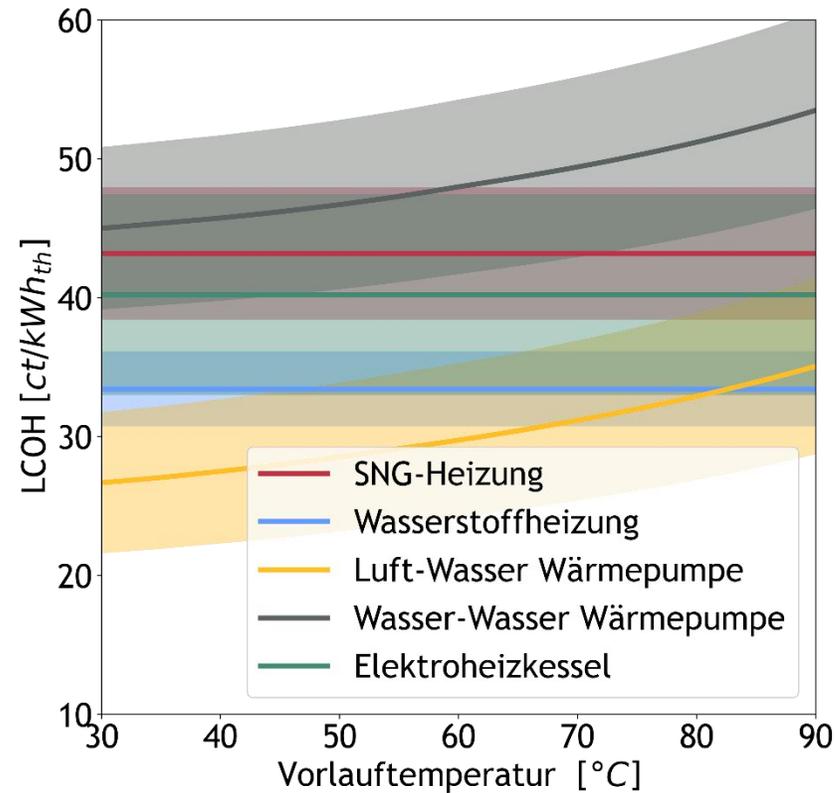
Zentrales Heizen bei einem Wasserstoffpreis von 100 EUR/MWh



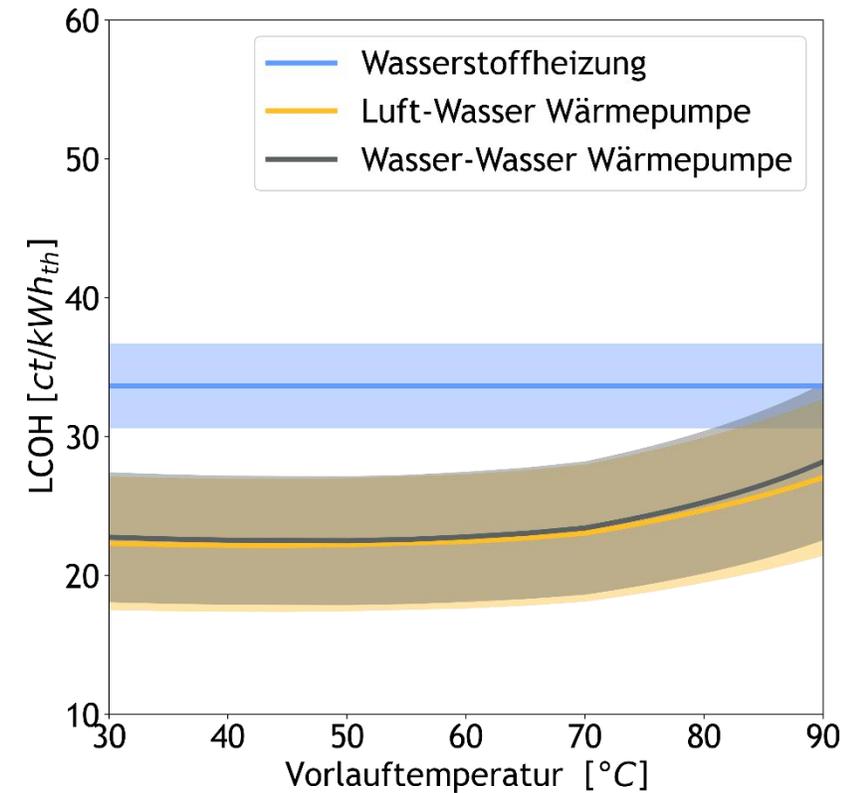
Quelle: Eigene Darstellung.

Anhang V - Wärmegestehungskosten im Beispielgebiet in Zündorf

Dezentrales Heizen bei einem Wasserstoffpreis von 200 EUR/MWh



Zentrales Heizen bei einem Wasserstoffpreis von 200 EUR/MWh



Quelle: Eigene Darstellung.

Anhang VI - Techno-ökonomische Parameter für die Berechnung der Wärmegestehungskosten

Energieeffizienz von Gas- und Wasserstoffkesseln	[-]	0,95
Energieeffizienz von Elektroheizkesseln	[-]	0,99
Kalkulatorischer Zinssatz	[%]	5
Abschreibedauer	[a]	20
Volllaststunden	[h]	1900-2100
FOM Wärmepumpen dezentral	[EUR/kW _{th} /a]	25
FOM Wärmepumpen zentral	[EUR/kW _{th} /a]	2,5
FOM Gas- und Wasserstoffkessel dezentral	[EUR/kW _{th} /a]	20
FOM Gas- und Wasserstoffkessel zentral	[EUR/kW _{th} /a]	2,5
Spezifischer Warmwasserbedarf	[kWh/Bewohner]	500
Spezifische Heizlast der Gebäude	[W/m ²]	50
Spezifische Heizlast für Warmwasserbereitung	[W/Bewohner]	200
Beheizte Fläche pro Bewohner	[m ² /Bewohner]	30
Spezifischer Warmwasserspeicherbedarf	[l/Bewohner]	50
Spezifischer Pufferspeicherbedarf bei Wärmepumpensystemen	[l/kW _{th}]	20
Kapazität der Wärmepumpe am Bivalenzpunkt	[kW/kW spezifische Heizlast]	0,73
Kapazität des Heizstabs am Bivalenzpunkt	[kW/kW spezifische Heizlast]	0,36
Deckungsbeitrag von Luft-Luft Wärmepumpen im bivalent monoenergetischen Betrieb	[%]	98