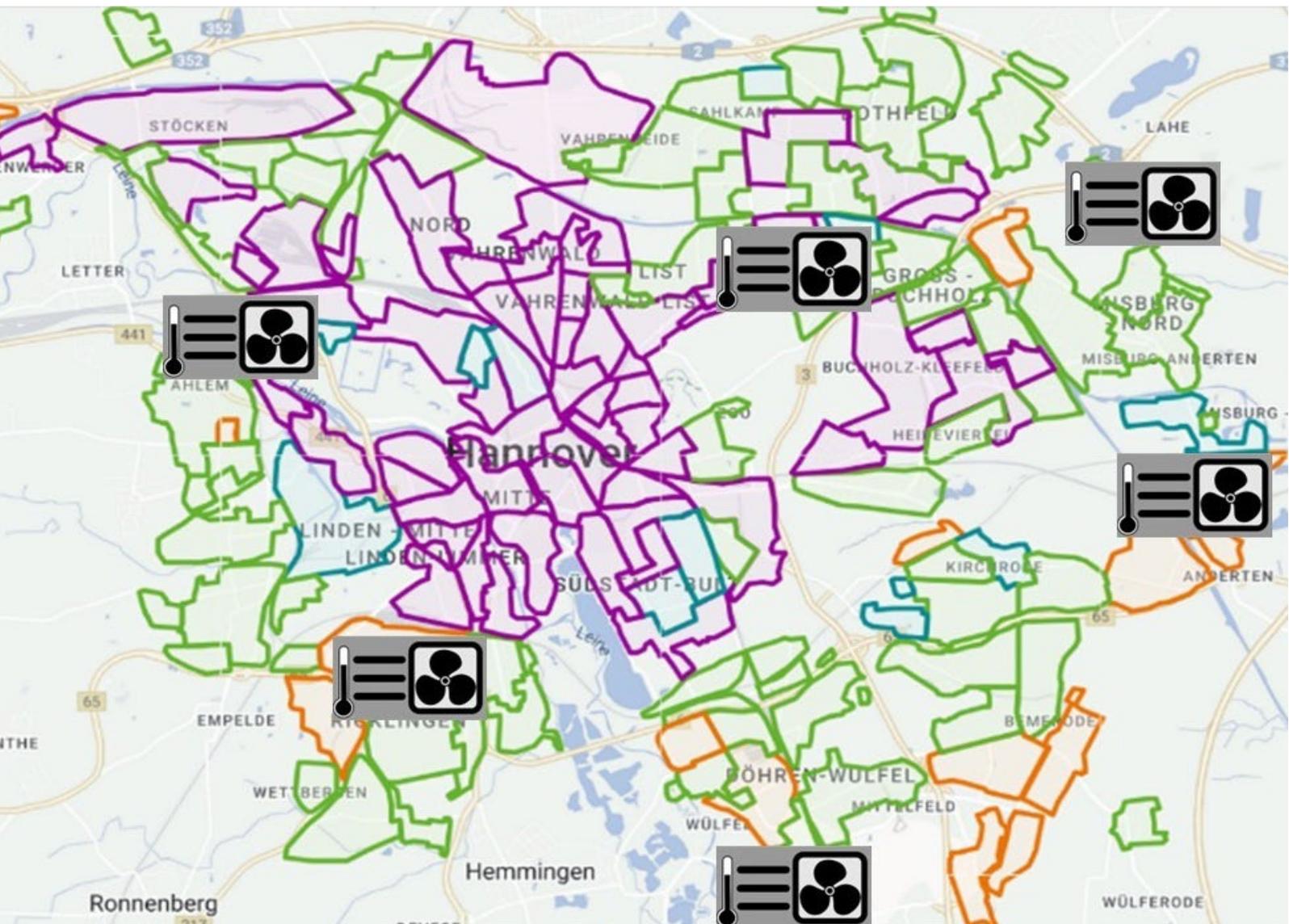


SOLARE WÄRMEPUMPE – HEIZEN UND KÜHLEN MIT HILFE DER SONNE

# Wärmepumpen in der Wärmeplanung

Jens Clausen



# IMPRESSUM

## KURZTITEL

WÄRMEPUMPEN IN DER WÄRMEPLANUNG

## AUTOR

Jens Clausen (Borderstep Institut)

M [clausen@borderstep.de](mailto:clausen@borderstep.de)

## VERLAG

© Borderstep Institut 2023

## KONSORTIALFÜHRUNG

Institut für Meteorologie und Klimatologie | Leibniz Universität Hannover  
Herrenhäuser Str. 2 | 30419 Hannover

## PROJEKTPARTNER

Borderstep Institut für Innovation und Nachhaltigkeit gemeinnützige GmbH

Dr. Jens Clausen

Clayallee 323 | 14169 Berlin | +49 (0)30 30645 1000 | [www.borderstep.de](http://www.borderstep.de)

## ZITIERVORSCHLAG

Clausen, J. (2023). Wärmepumpen in der Wärmeplanung. Berlin: Borderstep Institut.

## TITELBILD

© Wärmekarte der enercity AG unter <https://www.waermeplanung-hannover.de/> und elconomeno@email.com auf openclipart

## FÖRDERMITTELGEBER

Das Projekt „Solare Wärmepumpe“ wird gefördert vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz im Rahmen der nationalen Klimaschutzinitiative.

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Klimaschutz



NATIONALE  
KLIMASCHUTZ  
INITIATIVE

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

# INHALTSVERZEICHNIS

<b>Impressum</b> .....	<b>II</b>
<b>Inhaltsverzeichnis</b> .....	<b>III</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b> .....	<b>V</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b> .....	<b>VI</b>
<b>1 Zusammenfassung</b> .....	<b>1</b>
<b>2 Die Wärmepumpe</b> .....	<b>4</b>
2.1 Die Wärmewende.....	4
2.2 Funktionsprinzip der Wärmepumpe .....	6
2.3 Luft-Wasser, Luft-Luft, Wasser-Wasser und Erdwärmepumpen .....	8
2.3.1 Effizienz der Wärmepumpe.....	9
2.3.2 Kosten einer Wärmepumpenanlage in Einfamilienhäusern .....	10
2.3.3 Arbeitszeit für die Installation.....	11
2.3.4 Kältemittel.....	12
2.3.5 Lieferfähigkeit der Branche.....	12
<b>3 Wärmepumpen in den Szenarien der Wärmeversorgung</b> .....	<b>13</b>
3.1 Wärmepumpen in Wohngebäuden.....	13
3.2 Zukünftige Wärmequellen der Fernwärmeerzeugung.....	15
<b>4 Anwendungsfelder von Wärmepumpen</b> .....	<b>18</b>
4.1 Einfamilienhäuser .....	20
4.1.1 Bungalow Baujahr 2002 mit Energieeffizienzklasse C mit PV und Stromspeicher .....	20
4.1.2 Reihenhendhaus Baujahr 1968 mit Energieeffizienzklasse D mit PV und Wallbox .....	21
4.1.3 Siedlungshaus Baujahr 1952 mit Energieeffizienzklasse E.....	22
4.1.4 Einfamilienhaus von 1977 mit Energieeffizienzklasse F mit PV und Stromspeicher.....	23
4.1.5 Fazit Einfamilienhäuser .....	24
4.2 Mehrfamilienhäuser .....	25
4.2.1 Eigentümergemeinschaft in Berlin Schöneberg in Haus von 1890 .....	25
4.2.2 Mehrfamilienhaus bei Stuttgart von 1960.....	26
4.2.3 Alte Dorfschule am Niederrhein von 1881.....	27
4.2.4 Etagenwohnung in Dresden .....	28
4.2.5 Fazit Mehrfamilienhäuser .....	28
4.3 Wärmepumpen in Wärmenetzen.....	29
4.3.1 Abwasser-Wärmepumpen .....	29

4.3.2 Flusswasser-Wärmepumpen.....	32
4.3.3 Nutzung von Abwärme über Wärmepumpen.....	34
4.4 Einordnung der Zahlen .....	36
<b>5 Wer darf wo eine Wärmepumpe aufstellen?.....</b>	<b>37</b>
5.1 Aufstellung von Luftwärmepumpen.....	37
5.2 Platzierung von Erdwärmepumpen.....	39
<b>6 Die Herausforderungen der Sektorkopplung .....</b>	<b>43</b>
6.1 Was bedeuten Wärmepumpen für das Stromnetz? .....	43
6.2 Ertüchtigung der Stromnetze .....	43
6.3 Flexibilisierung der Stromnetze .....	44
6.4 Die Einbindung neuer Kraftwerke in die Wärmewirtschaft .....	45
6.5 Die Kopplung von Wasserwirtschaft und Wärmeversorgung .....	46
<b>Quellen.....</b>	<b>48</b>

## ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Absatzzahlen für Wärmeerzeuger und Wärmepumpen bis 2045 .....	5
Abbildung 2: Absatzzahlen von Wärmepumpen in Deutschland 2003 bis 2022 nach Wärmepumpentypen.....	5
Abbildung 3: Funktionsprinzip der Wärmepumpe.....	6
Abbildung 4: Kosten verschiedener Wärmepumpenanlagen in Deutschland 2022 .....	11
Abbildung 5: Entwicklung des Bestandes an Wärmeerzeugern in Deutschland bis 2045 .....	14
Abbildung 6: Anteil des dänischen Wärmebedarfs, der 2020 durch verschiedene Energieträger gedeckt wurde .....	14
Abbildung 7: Entwicklung der Fernwärmeerzeugung in Deutschland bis 2045 .....	16
Abbildung 8: Wie entwickeln sich die Energiepreise langfristig?.....	18
Abbildung 9: Verteilung des witterungsbereinigten Verbrauchs für Raumheizung und Warmwasser nach Effizienzklassen .....	19
Abbildung 10: Bungalow in Hannover, Energieverbrauch, Treibhausgasemissionen und Kosten .....	21
Abbildung 11: Reihenendhaus, Energieverbrauch, Treibhausgasemissionen und Kosten .....	22
Abbildung 12: Siedlungshaus, Energieverbrauch, Treibhausgasemissionen und Kosten .....	23
Abbildung 13: Einfamilienhaus, Energieverbrauch, Treibhausgasemissionen und Kosten .....	24
Abbildung 14: Eigentümergemeinschaft, Energieverbrauch, Treibhausgasemissionen und Kosten ...	25
Abbildung 15: Mehrfamilienhaus, Energieverbrauch, Treibhausgasemissionen und Kosten .....	26
Abbildung 16: Alte Dorfschule, Energieverbrauch, Treibhausgasemissionen und Kosten .....	27
Abbildung 17: Luft-Luft Wärmepumpe in einer Etagenwohnung.....	28
Abbildung 18: Wärmepumpen in der ebswien Kläranlage im Januar 2023.....	29
Abbildung 19: Rathaus von Fürth.....	30
Abbildung 20: In Abwasserrohr integrierter Wärmetauscher für den Kanalneubau.....	32
Abbildung 21: Einbau der Flusswasser-Wärmepumpe bei den Stadtwerken Rosenheim.....	34
Abbildung 22: Großwärmepumpen im Stockholmer Wärmenetz .....	35
Abbildung 23: Beispielhaftes Reihenhausgrundstück in Hannover .....	38
Abbildung 24: Grenzabstand von Wärmepumpen (WP).....	39
Abbildung 25: Minimale Jahresmitteltemperatur in Abhängigkeit vom Alter der Sonden .....	40
Abbildung 26: Geothermie, geht das bei mir? Eingabemaske und Ausgabe für Erdsonde .....	42
Abbildung 27: Anteile an Elektrofahrzeugen je Wohneinheit und Wärmepumpen je Gebäude – Jeder dargestellte Datenpunkt entspricht einer Region in Deutschland .....	44

## TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Anforderungen der Bundesländer an den Abstand einer Luftwärmepumpe zum Nachbargrundstück.....	37
---	----

## 1 Zusammenfassung

Für eine klimaneutrale Heizung des Gebäudebestandes ist eine große Zahl von Wärmepumpen erforderlich. Zwar hat die Absatzzahl von Heizungs-Wärmepumpen in Deutschland 2022 erstmals die Zahl von 230.000 Wärmepumpen überschritten, für die Realisierung von Klimaneutralität in 2045 oder früher ist es aber erforderlich, dass möglichst ab sofort gar keine Gas- und Ölheizungen mehr verkauft werden und Fernwärmeanschlüsse und Wärmepumpen deren Marktanteile „übernehmen“. Sie sollten in einer Stückzahl von deutlich über 800.000 pro Jahr installiert werden.

In den kommunalen Wärmeplänen werden drei Typen von Versorgungsgebieten unterschieden. In allen drei sind Wärmepumpen wichtig:

- (1) In **Gebieten mit größeren Fernwärmenetzen** können große Wärmepumpen eingesetzt werden, um Wärme aus Wärmequellen mit niedrigen Temperaturen wie z.B. Fluss-, See- oder Abwasser, industrielle Abwärme oder solare oder geothermische Wärme auf die notwendige Vorlauftemperatur „hochzupumpen“ (vgl. Kapitel 3.2 und 4.3).
- (2) Auch in **Gebieten mit Quartierslösungen** können größere Wärmepumpen die gemeinschaftliche Wärmeversorgung übernehmen (vgl. Kapitel 3.2 und 4.3).
- (3) Und in **Gebieten der dezentralen Versorgung**, in denen die Wärmeversorgung für jedes Gebäude individuell klimaneutral erfolgen muss, ist die Wärmepumpe die einzige uneingeschränkt skalierbare Wärmetechnologie. Ihre wesentlichen Konkurrenten sind die Heizung mit Holz oder Pellets, für die die Brennstoffversorgung mittelfristig sehr unsicher ist (Scientists for Future, 2022a) oder die Heizung mit Wasserstoff, dessen zukünftige Bereitstellung in größeren Mengen als äußerst unwahrscheinlich gilt und für den darüber hinaus hohe Preise erwartet werden (Clausen, Fichter, Kern, & Schmelzle, 2022; Scientists for Future, 2022d). Neben der Verbreitung der Wärmepumpe ist wichtig, durch gezielte Unterstützung der Sanierung wenig energieeffizienter Gebäude zu erreichen, dass ein hoher Anteil der Gebäude „wärmepumpenfähig“ wird (vgl. Kapitel 3.1, 4.1 und 4.2).

Die hier vorliegende Broschüre soll die Verbindung zwischen der Technologie der Wärmepumpe und der Aufgabe der kommunalen Wärmeplanung herstellen. Denn soll ein solcher Plan aufgestellt werden, dann sollten die Planenden möglichst gut über alle Optionen einer nachhaltigen Wärmeversorgung informiert sein. In den folgenden Kapiteln wird daher dargestellt:

- ▶ wie eine Wärmepumpe funktioniert (Kapitel 2),
- ▶ welche Rolle der Wärmepumpe in den wichtigen Szenarien der Energieversorgung zugeschrieben wird (Kapitel 3),
- ▶ welche Anwendungen von Wärmepumpen es in einzelnen Gebäuden und im Rahmen von Wärmenetzen gibt (Kapitel 4),
- ▶ wo eine Wärmepumpe aufgestellt werden darf (Kapitel 5) sowie
- ▶ welche Chancen aus der sogenannten Sektorkopplung entstehen, also immer dann, wenn durch geschickte Planung die Stromversorgung, die Wärmeversorgung und die Wasserversorgung so optimiert werden, dass sie sich gegenseitig unterstützen.

Die vorliegende Studie wurde im Projekt „Solare Wärmepumpe – heizen und kühlen mit Hilfe der Sonne“, gefördert vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) im Rahmen der

nationalen Klimaschutzinitiative und koordiniert durch das Institut für Meteorologie und Klimatologie der Leibniz-Universität Hannover, erstellt.

Im Rahmen der Studie konnte eine Reihe von politischen Handlungsbedarfen identifiziert werden:

**Abbau von Unkenntnis und Ängsten vor der Wärmepumpe:** Nach einem knappen halben Jahr „Heizungshammer-Kampagne“ gibt es vielfältig Falschinformationen und Mythen in den Köpfen. Intensive Kampagnen sind erforderlich, um das Vertrauen in die Technik in der breiten Gesellschaft und auch in der Politik wieder zu stärken.

**Wärmepumpen in Wärmenetzen:** Großwärmepumpen können für die Versorgung von kleinen wie großen Wärmenetzen eine wichtige Rolle spielen. In Niedersachsen verteilen Wärmenetze gegenwärtig ca. 7 TWh/a Wärme. Der gesamte Raumwärmebedarf in Niedersachsen liegt bei ca. 82 TWh/a. Bei einem zukünftigen Wärmenetz-Anteil von 20 TWh/a kann die dafür nötige Wärme in der Grund- und Mittellast völlig ohne Verbrennung gedeckt werden. Als Wärmepotenziale bieten sich die Flusswasser-Wärme an (ca. 40 TWh/a verfügbar), die die gegenwärtig aufgrund des Klimawandels zu warmen Flüsse etwas abkühlen würde, die Wärme aus Abwasser (ca. 5 TWh/a verfügbar) sowie die Abwärme aus Industrieprozessen (ca. 13 TWh/a verfügbar). Neben der Einspeisung in große Fernwärmenetze können diese Wärmequellen auch für vielfältige Quartiersnetze genutzt werden.

**Sektorkopplung Strom-Wärme:** Die Kraftwerksstrategie der Bundesregierung sieht ein großes Programm zum Bau von Spitzenlast-Gaskraftwerken vor, die später auf Wasserstoff umgestellt werden sollen. Diese Kraftwerke sollten als kleine Einheiten (50 bis 200 MW) in der Nähe existierender oder geplanter Fernwärmenetze entstehen. Durch die Nutzung von KWK kann dieselbe Anlage dann auch die nötige winterliche Spitzenlast für die Fernwärme erzeugen. Außerdem ist die entlastende Wirkung auf das Stromsystem höher, denn während das Gas-Spitzenlastkraftwerk Strom UND Wärme erzeugt, können Großwärmepumpen außer Betrieb genommen werden. Das würde die entlastende Wirkung eines 200 MW Kraftwerks auf das Stromnetz z.B. in der Landeshauptstadt Hannover um ca. 10 % steigern.

**Sektorkopplung Wasserstoff-Wärme:** Die hohe Zahl der geplanten Elektrolyseanlagen sollte gleichermaßen in der Nähe existierender oder geplanter Fernwärmenetze entstehen. Denn etwa 20 % des für die Elektrolyse eingesetzten Stroms fallen als Abwärme auf einem Temperaturniveau von 55 bis 60 °C an. Auch diese Wärmemenge muss unbedingt für die Nah- und Fernwärme gesichert werden.

**Genehmigung von Erdsondenbohrungen für Wärmepumpen:** Für diese Genehmigung ist oft die untere Wasserbehörde zuständig. Sie prüft neben der grundsätzlichen Genehmigungsfähigkeit auch den exakten Ort der Bohrung. Dabei hält sie sich in Niedersachsen oft an die 5-m Sollvorschrift (LBEG, 2012). Diese Vorschrift ist aber an Grundstücksgrenzen zu Straßen- und Verkehrsflächen unsinnig, da im Bereich dieser Flächen nicht mit Erdwärmebohrungen zu rechnen ist. Eine stärkere Sensibilisierung der Wasserbehörden für Angelegenheiten der Wärmeversorgung und Wärmeplanung scheint daher sinnvoll. Auch die Straßenbauverwaltungen sollten involviert werden, um ihr Desinteresse an Erdwärme zu bestätigen.

**Genehmigung der Wärmentnahme aus Gewässern:** Fluss- und Seewasser-Wärmepumpen sind für die zukünftige Wärmeversorgung von hoher Bedeutung. Die für wasserrechtliche Genehmigungen und Erlaubnisse zuständigen Behörden auf Ebene des Bundes, des Landes und der Landkreise sollten auf die auf sie zukommenden Anforderungen der zukünftigen Wärmeversorgung vorbereitet werden. Gegenstand solcher Genehmigungen können sowohl die Errichtung von Entnahme- und

## WÄRMEPUMPEN IN DER WÄRMEPLANUNG

Einleitungsbauwerken sein als auch die Beurteilung der Unbedenklichkeit der Entnahme von Wärme aus dem Gewässer betreffen.

**Genehmigung der Wärmegegewinnung in Abwasserkanälen:** Auch die Stadtentwässerungsbetriebe sollten auf die auf sie zukommenden Anforderungen der zukünftigen Wärmeversorgung vorbereitet werden. Gegenstände, die einer Zustimmung durch die Entwässerungsbetriebe bedürfen, könnte sowohl die Errichtung von Wärmeentnahmebauwerken sein als auch die Beurteilung der Unbedenklichkeit der Entnahme von Wärme aus dem Kanalsystem betreffen.

## 2 Die Wärmepumpe

### 2.1 Die Wärmewende

Nach dem 2023 novellierten Gebäudeenergiegesetz (Die Bundesregierung, 2023) soll jede neu eingebaute Heizung ab 1. Januar 2024 mit mindestens 65 % erneuerbarer Energien betrieben werden. Beim Neubau von Gebäuden genauso wie beim Ausfall einer alten Heizungsanlage und dem notwendigen Ersatz sind Anlagen gefordert, die mindestens 65 % erneuerbare Wärme nutzen, z.B. durch (Die Bundesregierung, 2023):

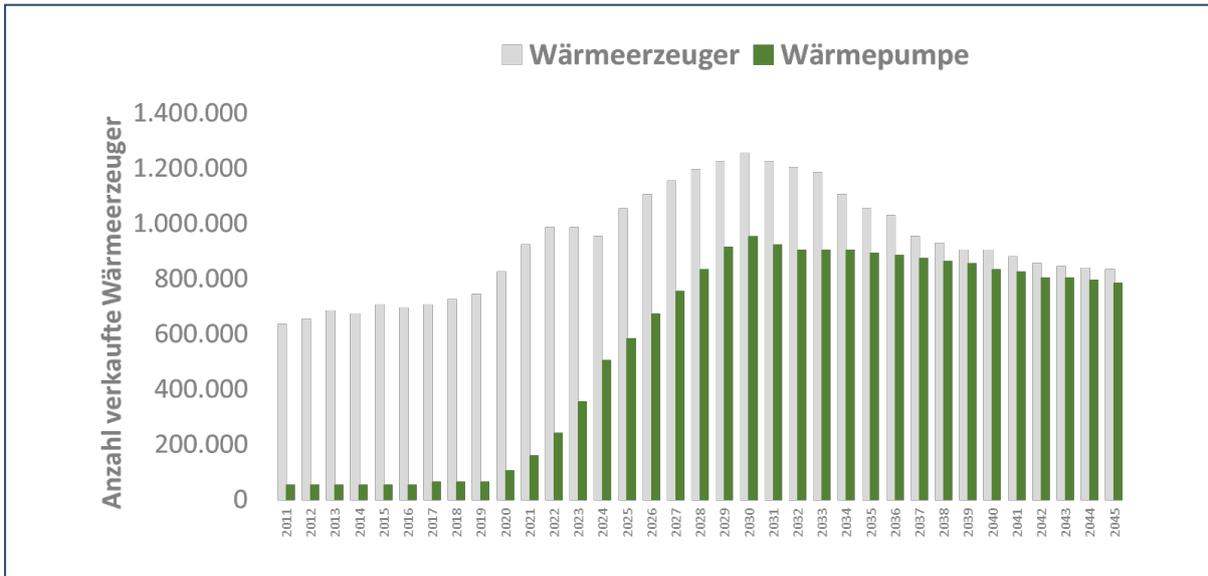
- ▶ Anschluss an ein Wärmenetz,
- ▶ Einbau einer Wärmepumpe mit der Wärmequelle Luft, Erdreich oder Wasser,
- ▶ Einbau einer Biomasseheizung auf Basis von fester oder flüssiger Biomasse,
- ▶ Einbau einer Gasheizung unter Nutzung von grünen Gasen,
- ▶ Einbau einer Hybridheizung,
- ▶ Nutzung von solarthermischer Wärme,
- ▶ Einbau einer Stromdirektheizung (nur in besonders effizienten Gebäuden).

Die deutliche Warnung der Bundesregierung vor Knappheiten bei der Versorgung mit Biomasse, grünem Wasserstoff und anderen strombasierten synthetischen Brennstoffen sowie die Einschränkung der Nutzung einer Stromdirektheizung auf extrem energieeffiziente Gebäude lässt die verbleibende Auswahl in vielen Fällen auf den Anschluss an ein Wärmenetz oder den Einbau einer Wärmepumpe zusammenschmelzen (BMWK & BMWSB, 2022).

Die konsequentere Klimapolitik der neuen Bundesregierung führt damit für alle Wohngebäude, die nicht an ein Wärmenetz angeschlossen werden können, dazu, dass die Wärmepumpe sich als Heizsystem der Zukunft mit sehr hohem Marktanteil etablieren wird. Zudem ist zu erwarten, dass diese Vorschriften nicht nur erlassen werden, sondern dass auch ein Vollzug organisiert wird. Eine regelmäßige Kontrolle durch die Schornsteinfegerinnen und Schornsteinfeger soll dafür sorgen, dass die Vorschriften auch umgesetzt werden (BMWK & BMWSB, 2022).

Die Bundesregierung begann im Sommer 2022 zusammen mit der Heizungsbranche einen Konsultationsprozess in der Form von drei virtuellen Wärmepumpen-Gipfeln. Es wurde das Ziel vereinbart, den Marktanteil von Wärmepumpen von 16 % in 2021 auf 66 % in 2027 zu steigern und dabei in 2025 das erste Mal mehr als 500.000 Wärmepumpen zu installieren (Wärmepumpen-Gipfel, 2022). Der Bundesverband Wärmepumpe sieht als Folge der Beschlüsse des Wärmepumpengipfels (Wärmepumpen-Gipfel, 2022) folgende Entwicklung kommen:

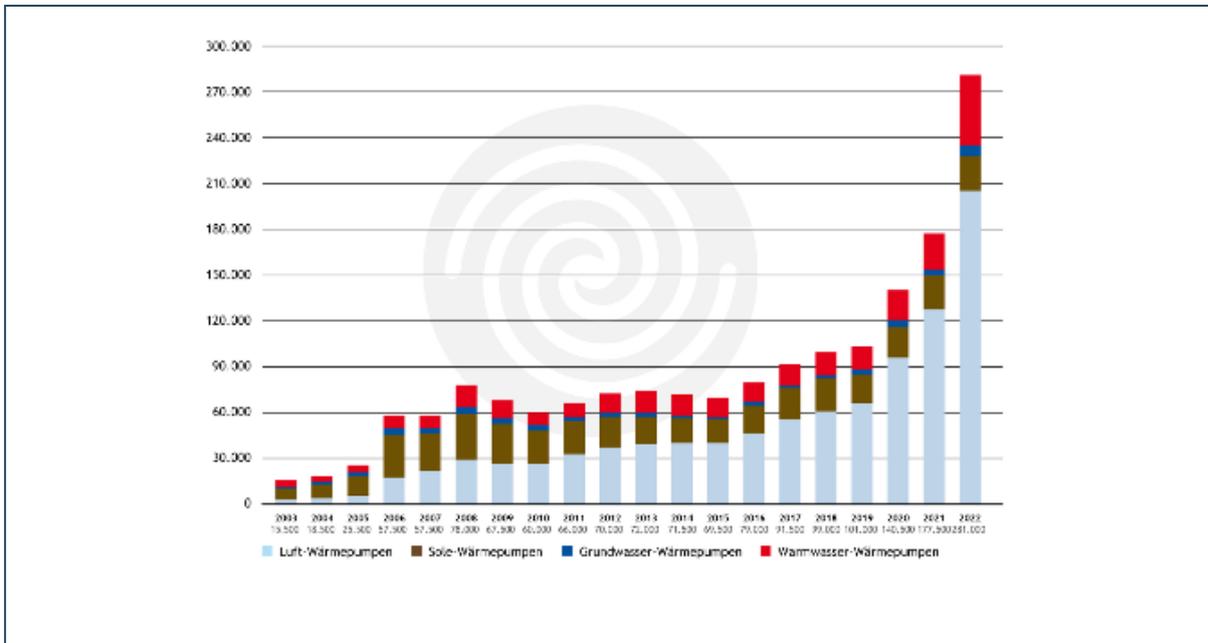
Abbildung 1: Absatzzahlen für Wärmeerzeuger und Wärmepumpen bis 2045



Quelle: BWP (2022)

Erfreulich ist, dass die Zahl der installierten Wärmepumpen seit einigen Jahren deutlich steigt und besonders durch die seit dem Jahr 2019 verbesserten Förderbedingungen im Jahr 2022 erstmals knapp 280.000 Stück, davon 236.000 Heizungswärmepumpen, erreichte. Jeder vierte installierte Wärmeerzeuger war 2022 eine Wärmepumpe.

Abbildung 2: Absatzzahlen von Wärmepumpen in Deutschland 2003 bis 2022 nach Wärmepumpentypen



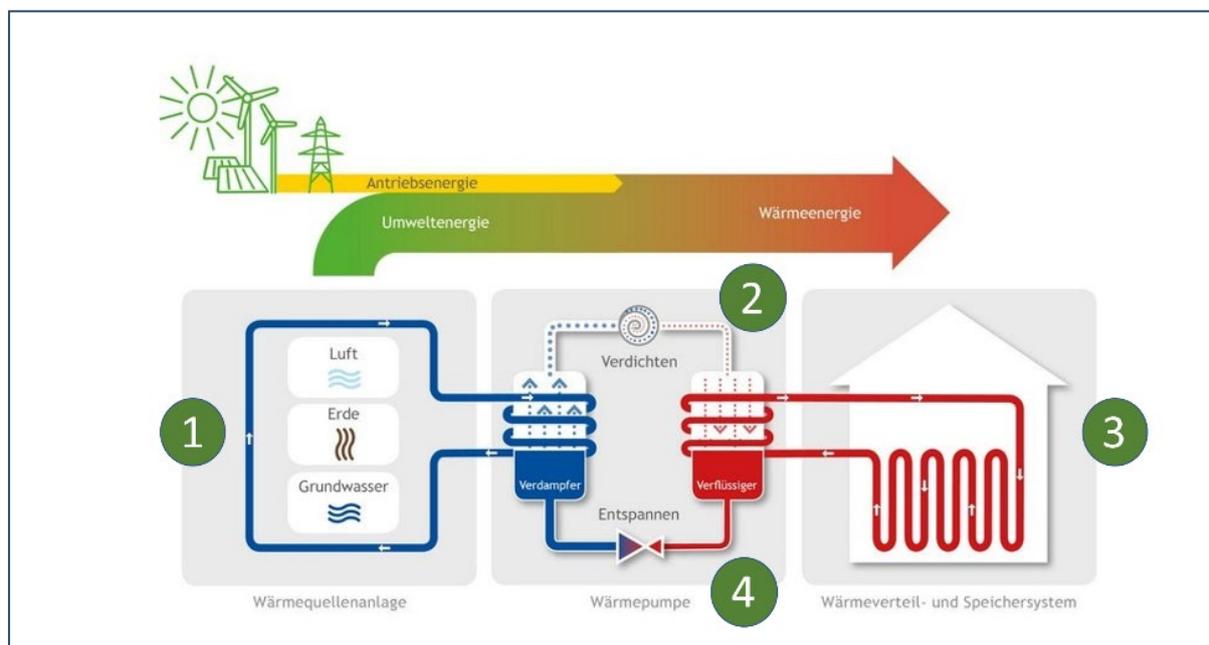
Quelle: Bundesverband Wärmepumpe (2023)

87 % der installierten Geräte waren Luft-Wasser-Wärmepumpen. Der Marktanteil von erdgekoppelten Wärmepumpen geht langsam zurück. Er lag 2006 noch bei über 50 % ist bis 2022 auf ca. 10 % der Heizungswärmepumpen gefallen.

### 2.2 Funktionsprinzip der Wärmepumpe

Vielen Menschen ist nicht klar, wie eine Wärmepumpe funktioniert. Dabei handelt es sich mehr oder weniger um den gleichen physikalischen Prozess wie in einem Kühlschrank, den wir alle kennen. Ein Kühlschrank „pumpt“ Energie aus dem Innenraum heraus in die umgebende Luft. Eine Wärmepumpe „pumpt“ Energie aus der Umgebung, z.B. aus der Luft oder aus der Erde, in ein Haus. Aber wie macht sie das eigentlich? In einzelnen Schritten erklärt, ist das ganz einfach. Der Bundesverband Wärmepumpe e.V. (2021) stellt das Funktionsprinzip der Wärmepumpe wie folgt grafisch dar:

Abbildung 3: Funktionsprinzip der Wärmepumpe



Quelle: nach Bundesverband Wärmepumpe (2021), modifiziert durch Clausen (2022)

Durch die **Wärmequellenanlage (1)** wird die Wärmeenergie der Umwelt (Luft, Erde, Wasser) entzogen. Die **Wärmepumpe (2)** sorgt mit dem Verdichter für die nötige Erhöhung der Temperatur. Das **Wärmeverteilsystem (ggf. mit Speicher) (3)** bringt die Wärme in das zu beheizende Gebäude und auf dem Rückweg wiederum in der **Wärmepumpe (4)** erfolgt die Entspannung und damit Abkühlung des Wärmeträgermediums. Dieses kann dann, wenn es möglichst weit abgekühlt ist, wieder Wärme aus der Umgebung aufnehmen.

Die einzelnen Schritte dieses Prozesses scheinen kompliziert, sind es aber gar nicht:

**Schritt 1 – Die Wärmequelle:** Ein stark abgekühltes Wärmeträgermedium wird in den Rohren eines Wärmetauschers durch eine relativ wärmere Umgebung geführt. Das können z.B. die Rohre einer Erdwärmesonde sein, die neben dem Gebäude ca. 100 m in die Tiefe führen. Es kann aber auch über

einen Wärmetauscher der Kontakt mit der Außenluft sein. Hier nimmt das Medium einen Teil der Energie auf, die es später an die Wohnung abgeben wird, es erwärmt sich.

**Schritt 2 - Der Verdichter:** Alle, die schon mal mit einer Fahrradpumpe einen Reifen aufgepumpt haben, wissen, dass die Luftpumpe dabei warm wird. Mit der Hand, die die Pumpe vorne festhält, ist es spürbar. Und auch später, wenn man das Käppchen auf das warme Ventil schraubt, ist die Wärme spürbar. Wenn also ein Medium wie z.B. Luft verdichtet wird, dann wird dies Medium wärmer. Diesen Effekt macht sich die Wärmepumpe zu nutze. Im Verdichter erhöht sich die Temperatur und natürlich auch der Druck des Mediums. Um den Verdichter anzutreiben wird elektrische Energie benötigt.

**Schritt 3 – Die Wärmeverteilung:** Das Medium hat hinter dem Verdichter eine Temperatur erreicht, mit der man heizen und warmes Wasser bereiten kann. Es durchströmt einen Wärmetauscher<sup>1</sup> und erhitzt Wasser oder Luft, welches nun entweder die Heizkörper, eine Fußboden-, Wand- oder Deckenheizung<sup>2</sup> durchströmt und die Wärme an die Wohnräume abgibt oder durch Luftleitungen zu Luftverteilteräten geleitet wird und als warme Heizluft in den Raum strömt.

**Schritt 4 – Die Entspannung:** Das im Wärmetauscher abgekühlte Medium, das immer noch unter höherem Druck steht, durchströmt nun zum Entspannen ein Expansionsventil. Das ist quasi so, als wenn unter Druck stehende Luft durch eine kleine Öffnung aus einem Luftballon entweicht. Dabei sinken sowohl der Druck als auch die Temperatur des Mediums wieder stark ab, häufig auf Minusgrade.

Eine Wärmepumpenanlage hat drei zentrale technische Kennzahlen, nämlich Leistung, Leistungszahl und Jahresarbeitszahl (JAZ), die im Folgenden erläutert werden.

Die erste Kennzahl ist die **Leistung**, auf die die Wärmepumpenanlage ausgelegt ist. Für die Versorgung eines Einfamilien-Passivhauses mit Wärme ist oft eine Leistung von 3 kW ausreichend, für einen Neubau mit Standardwärmedämmung ist eine Wärmepumpe mit einer Leistung von 4 bis 6 kW erforderlich und Altbauten können noch höhere Leistungen erfordern. Für größere Gebäude wie Mehrfamilienhäuser stehen Wärmepumpen mit deutlich höherer Leistung zur Verfügung.

Die zweite technische Kennzahl ist die **Leistungszahl**. Die Leistungszahl gibt an, wieviel Wärmeenergie mit jeweils einer Kilowattstunde elektrischer Antriebsenergie in das Haus befördert werden kann. Je höher diese Zahl ist, desto weniger Strom wird benötigt und desto preiswerter ist der Betrieb der Wärmepumpe. Die Leistungszahl ist abhängig von der Temperatur der Wärmequelle sowie der notwendigen Vorlauftemperatur für das Wärmeverteilsystem. Es handelt sich also eigentlich nicht um eine feste Zahl, sondern eher um eine Kurvenschar.

Um die energetische Effizienz von Wärmepumpen im Praxisbetrieb vergleichen zu können, wird die **Jahresarbeitszahl (JAZ)** einer Anlage ermittelt (Baunetz-Wissen, 2022). Zwar wird für jede Wärmepumpe vom Hersteller die individuelle Effizienz als Leistungszahl angegeben, diese wird jedoch auf Testständen festgestellt, unter optimalen Einstell- und Arbeitsparametern, und bildet daher nicht die realen Betriebsbedingungen von z.B. sich laufend verändernden Außentemperaturen ab. Aussagekräftiger ist daher die JAZ. Vereinfacht ausgedrückt ist die JAZ der Quotient aus erzeugter Wärme

---

<sup>1</sup> Ein **Wärmetauscher** sorgt dafür, dass Wärme aus einer Flüssigkeit in eine andere transportiert wird. Dafür kann man z.B. das erhitzte Wärmeträgermedium in Rohren durch einen Behälter mit Heizwasser führen. Das Heizwasser kommt mit den warmen Rohren in Berührung und erwärmt sich.

<sup>2</sup> Heizwasser strömt meistens durch an der Wand unter den Fenstern angebrachte Heizkörper. Rohre für das Heizwasser können aber auch im Fußboden oder in der Wand verlegt werden und diese großflächig erwärmen. Das ist nicht nur sehr angenehm, sondern es führt auch dazu, dass das Heizwasser gar nicht so heiß sein muss. Oft reicht es, das Heizwasser für **Fußboden, Wand oder Deckenheizungen** auf 30 °C bis 35 °C zu erwärmen.

und dem dafür benötigten Strom, bezogen jeweils auf ein volles Jahr (Baunetz-Wissen, 2022). Um die Jahresarbeitszahl ermitteln zu können benötigt man einen Wärmemengenzähler und einen separaten Stromzähler, der den Stromverbrauch der Wärmepumpe misst.

Technische Anforderungen an eine für ein Gebäude optimale Wärmepumpe sind:

- ▶ Die Wärmepumpe hat eine ausreichende und trotzdem möglichst niedrige Leistung, da eine zu große Dimensionierung eine schlechtere Effizienz mit sich bringt.
- ▶ Außerdem ist es gut, wenn die Anlage eine möglichst warme Wärmequelle nutzt. So lässt sich z.B. die Umgebungswärme aus einer 10 °C warmen Erdwärmepumpe effizienter auf das Niveau von Heizwärme pumpen als die winterliche „Wärme“ aus 0 °C „kalter“ Außenluft.
- ▶ Für eine hohe Effizienz, also eine hohe Jahresarbeitszahl, ist es weiter vorteilhaft, die Wärmeverteilung so zu gestalten, dass eine niedrige Vorlauftemperatur zur Beheizung des Gebäudes ausreicht. Oft hilft hier schon die Installation einiger größerer Heizkörper oder die Montage von Ventilatoren an den Heizkörpern, wodurch deren Heizleistung deutlich steigt. Besonders günstig ist auch eine Flächen-, Wand- oder Deckenheizung, für die oft eine Vorlauftemperatur von 30 °C bis 35°C ausreicht, statt konventionelle Heizkörper, die je nach Größe 40 °C bis 60 °C Vorlauftemperatur für die Wärmeverteilung erfordern (Miara, 2022; Scientists for Future, 2022c).

Der Klimawandel verändert aber die Randbedingungen für die Auswahl von Wärmepumpen. In der Referenzperiode 1961 bis 1990 betrug die Mitteltemperatur in Niedersachsen im kältesten Monat (Januar) etwa 1 °C (DWD, 2018, S. 7). Durch den fortschreitenden Klimawandel lag dieses Mittel schon 2014 bereits bei ca. 3 °C (DWD, 2018, S. 7), und es ist in Zukunft mit weiter steigenden Temperaturen zu rechnen, so dass sich der Vorteil der „warmen“ Erdwärmepumpe gegenüber eine Luft-Luft Wärmepumpe in Zukunft verringern dürfte.

### 2.3 Luft-Wasser, Luft-Luft, Wasser-Wasser und Erdwärmepumpen

Die Vielfalt der Wärmepumpen ist groß. Je nachdem, welche Quelle an Umweltwärme genutzt und wie diese Wärme im Gebäude verteilt wird, werden Wärmepumpen unterschiedlich bezeichnet.

In Deutschland sehr verbreitet ist die **Luft-Wasser Wärmepumpe**, die der Umgebungsluft Wärme entzieht und diese in einen Heizwasserkreislauf einspeist. In 2022 repräsentierten Luft-Wasser Wärmepumpen einen Marktanteil von 87 % vom Wärmepumpenabsatz (BWP, 2023).

Die **Erdwärmepumpe**, auch **Sole-Wärmepumpe** genannt, bezieht ihre Umgebungswärme aus einer ca. 100 m tiefen Bohrung oder aus einem in einigen Metern Tiefe verlegten Erdkollektor. Erdwärmepumpen speisen einen Heizwasserkreislauf. Ihr Marktanteil 2022 lag bei ca. 10 % (BWP, 2023).

Die **Wasser-Wasser Wärmepumpe** nutzt eine Wasserader oder ein Gewässer als Wärmequelle. Sie pumpt z.B. Grundwasser aus der Erde, entzieht ihm Wärme und speist es leicht abgekühlt wieder zurück. Auch Wasser-Wasser Wärmepumpen speisen einen Heizwasserkreislauf. Als Variante existiert die **Abwasser-Wasser-Wärmepumpe**, die die Wärme aus einem in einem Abwasserkanal verlegten Wärmetauscher bezieht.

Die **Luft-Luft Wärmepumpe** entzieht ebenfalls der Umgebungsluft Wärme, speist diese aber nicht in einen Wasserkreislauf ein, sondern erwärmt einen Luftstrom. Dies kann entweder direkt in der Wärmepumpe geschehen (Monoblock), in separaten Geräten (Split-Anlage) oder der Luftstrom kann durch ein Rohrsystem verteilt werden.

- ▶ In einer **Split-Anlage** wird das in der Wärmepumpe erwärmte Kältemittel durch Rohre zu sogenannten Innengeräten geleitet, in denen es dann einen durch sie hindurch geleiteten Luftstrom erwärmt.
- ▶ Der Luftstrom einer **Monoblockanlage** tritt entweder direkt aus dem Gerät aus oder
- ▶ er kann durch eine **Monoblockanlage mit Rohrleitungssystem** im Haus verteilt werden.

Als Variante existiert weiter die **Abluft-Wärmepumpe**, die die Wärme des Abluftstroms einer Belüftungsanlage als Wärmequelle nutzt.

(Ab-)Wasser-Wasser Wärmepumpen, (Ab-)Luft-Luft Wärmepumpen erreichen in Deutschland nur minimale Marktanteile von zusammen ca. 3 % (BWP, 2023). Das ist in anderen Ländern völlig anders. In Finnland z.B. erreicht die Luft-Luft-Wärmepumpe einen Marktanteil von knapp 80 %, während die Luft-Wasser Wärmepumpe nur eine marginale Rolle spielt.

Es bleibt zu fragen, wie sich die in den verschiedenen Ländern unterschiedlichen Marktanteile erklären lassen und welche Vor- und Nachteile die Systeme jeweils aufweisen. Eine Reihe von Eigenschaften sollen im Folgenden betrachtet werden:

- ▶ Aus technischer Sicht ist die **Effizienz der Wärmepumpe** von hoher Bedeutung, da sie den späteren Stromverbrauch der Wärmepumpenheizung entscheidend bestimmt.
- ▶ Aus Sicht der Kunden sind die **Kosten einer Wärmepumpenanlage** wichtig, da eine preiswertere Technik auch weniger liquiden Haushalten die Investition in eine Wärmepumpe ermöglicht.
- ▶ Mit dem Ziel der Beschleunigung der Transformation ist auch die **Arbeitszeit für die Installation** von hoher Bedeutung, da der Umbau der Wärmeversorgung dann auch mit weniger Fachkräften durchgeführt werden kann.
- ▶ Aus ökologischer Sicht ist weiter das **Kältemittel** wichtig, denn der Klimaschutzeffekt einer Wärmepumpe wird in einigen Fällen durch extrem klimaschädliche Kältemittel verringert.

### 2.3.1 Effizienz der Wärmepumpe

Die Effizienz von **Erdwärmepumpen** wie auch von **Luft-Wasser Wärmepumpen** wurde z.B. durch das Fraunhofer ISE im Projekt WP-Smart untersucht. Der Ergebnisbericht gibt für Luft-Wasser Wärmepumpen auf der Basis von 29 gemessenen Anlagen Jahresarbeitszahlen in einem Bereich von 2,5 bis 3,8 (Mittelwert 3,1) an (Fraunhofer ISE, 2020). Auf Basis von 12 gemessenen Erdwärmepumpen wurde für die Jahresarbeitszahlen eine Spanne von 3,3 bis 4,7 (Mittelwert 4,1) ermittelt (a.a.O.). Auch eine schweizer Untersuchung findet ähnliche Werte (energie Schweiz & Bundesamt für Energie, 2021).

Weder in deutschen noch in schweizer Untersuchungen finden sich allerdings Ergebnisse aus der Messung von **Luft-Luft Wärmepumpen**, also Klimaanlage, die auch als Heizgerät eingesetzt werden. Verkaufszahlen von Luft-Luft Wärmepumpen werden durch den BWP nicht dokumentiert und sie spielen auch in den Feldmessungen des Fraunhofer ISE keine Rolle. Zudem werden in einschlägigen Studien Luft-Luft und Luft-Wasser Wärmepumpen nicht immer eindeutig unterschieden (z.B. Carroll, Chesser, & Lyons, 2020) oder es werden SCOP-Werte theoretisch und aufwendig errechnet, aber eben keine Jahresarbeitszahlen gemessen (z.B. Ruhnau, Hirth, & Praktiknjo, 2019).

Eine in den Neuengland-Staaten der USA durchgeführte Studie (Cadmus Group, 2022) erhob Daten in 43 Wohngebäuden, deren 73 Luft-Luft Wärmepumpen teils als Split-Anlagen, teils mit verrohrter Luftverteilung ausgeführt waren. Die Arbeitszahlen der Anlagen waren unterschiedlich. Für Split-

Anlagen mit zwei oder drei Inneneinheiten fand die Studie gemessene SCOP-Werte von 2,24 (15 Anlagen mit zwei Inneneinheiten) und 2,57 (13 Anlagen mit drei Inneneinheiten), war nur eine wandmontierte Inneneinheit vorhanden wurden bei 19 Anlagen durchschnittlich ein SCOP von 3,23 gemessen. Erfolgte die Warmluftverteilung durch Rohre, wurde an 15 Anlagen ein durchschnittlicher SCOP von 2,25 gemessen (Cadmus Group, 2022).

Nun wäre der Einsatz von Luft-Luft Wärmepumpen in Mehrfamilienhäusern besonders dann eine interessante Option, wenn jede Wohnung einzeln z.B. durch eine Gastherme beheizt wird. Bei Ausfall einer einzelnen Gastherme müsste nicht das ganze Haus umgebaut werden, sondern es könnten eine oder zwei Luft-Luft Wärmepumpen zur Beheizung einer einzelnen Wohnung installiert werden. Wäre das Ergebnis der Cadmus Group (Cadmus Group, 2022) robust, könnte dies mit einer Split-Anlage mit wandmontierter Inneneinheit und einem SCOP von ca. 3,2 erfolgen und wäre gar nicht viel weniger effizient als mit einer Luft-Wasser-Wärmepumpe. Die Heißwasserversorgung müsste dann mit einem Durchlauferhitzer und Fünflitergeräten realisiert werden.

Die LEG Immobilien SE, ein deutsches Wohnungsunternehmen mit Sitz in Düsseldorf, das über rund 167.000 Mietwohnungen verfügt (LEG, 2023), hat diesen Weg schon eingeschlagen. In Zukunft wird die LEG havarierte Gasetagenheizungen immer öfter nicht mehr durch neue Gasheizungen ersetzen, sondern die Wohnungen auf Luft-Luft Wärmepumpe umrüsten. Gemeinsam mit Mitsubishi wird angestrebt, nach einer Hochlaufphase jährlich bis zu 9.000 Wohnungen umzurüsten (LEG, 2023).

### **2.3.2 Kosten einer Wärmepumpenanlage in Einfamilienhäusern**

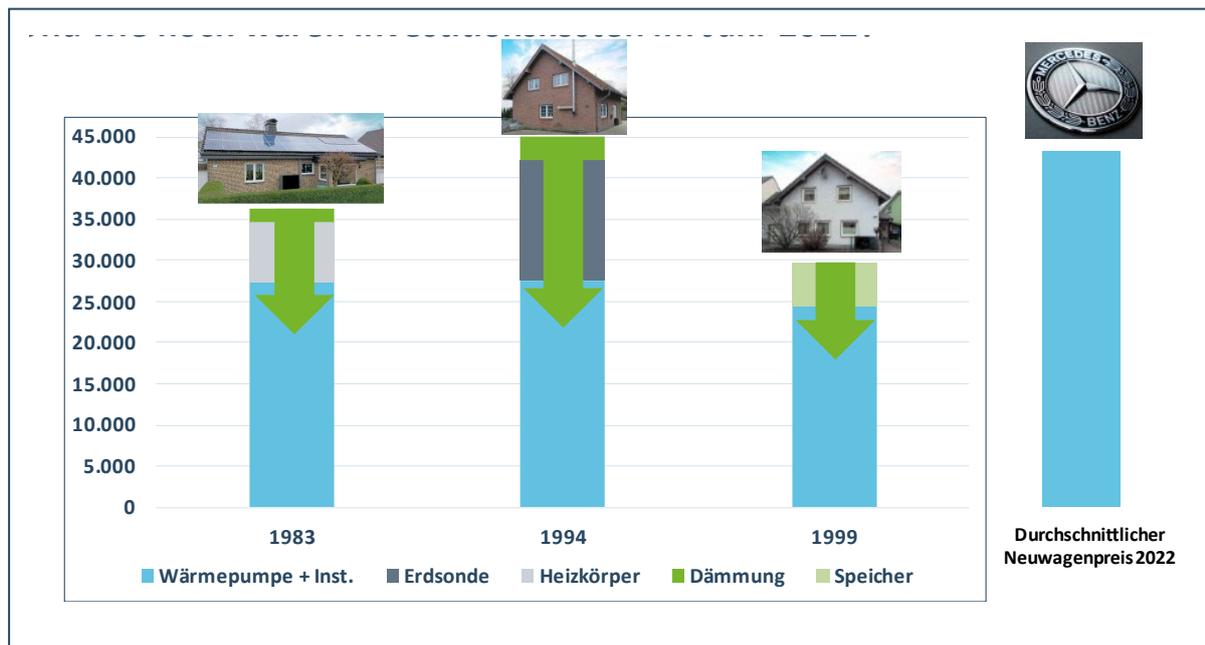
Der finnische Wärmepumpenverband SULPU veröffentlicht eine Statistik, die nicht nur die Zahl der verkauften und primär in Einfamilienhäusern eingebauten Wärmepumpen dokumentiert, sondern auch die dafür erforderlichen Investitionen. Auf dieser Basis lässt sich ein Vergleich der Kosten verschiedener Wärmepumpentypen aufstellen.

So wurden im Jahr 2022 die hohe Zahl von 161.920 Luft-Luft Wärmepumpen abgesetzt, 19.035 Luft-Wasser Wärmepumpen, 11.772 Erdwärmepumpen incl. Wasser-Wasser Wärmepumpen sowie 3.626 Abluft-Wärmepumpen (SULPU, 2023). Aus den im selben Dokument angegebenen Investitionssummen lassen sich für Erdwärmepumpen incl. Wasser-Wasser Wärmepumpen durchschnittliche Investitionen von ca. 32.500 € errechnen, für Luft-Wasser Wärmepumpen ca. 14.800 €, für Abluft-Wärmepumpen ca. 7.500 € und für Luft-Luft Wärmepumpen ca. 2.400 €.

Aufgrund der in Finnland günstigen Elektrizität, deren Preis seit 2012 von ca. 15 Cent/kWh auf gegenwärtig ca. 20 Cent/kWh incl. Steuern gestiegen ist (countryeconomy.com, 2023), werden die preiswerten Luft-Luft-Wärmepumpen häufig zusammen mit einer direktelektrischen Heizung als Backup installiert.

In Deutschland sind die Investitionskosten deutlich höher, werden dafür aber anteilig durch die Förderung wieder ausgeglichen (Deutsche Umwelthilfe, 2023).

Abbildung 4: Kosten verschiedener Wärmepumpenanlagen in Deutschland 2022



Quelle: Deutsche Umwelthilfe (2023), Foto rechts von Cédric Streit auf Unsplash

Die drei von der Deutschen Umwelthilfe dokumentierten, in 2022 realisierten, Fälle sind mit Investitionen zwischen 30.000 und 35.000 € für eine Luft-Wasser Wärmepumpe und 45.000 € für eine Erdwärmepumpe verbunden. Nach Förderung blieben für die Hausbesitzenden ca. 20.000 € übrig, die sie selbst tragen mussten.

Seit dem Beginn des russischen Krieges gegen die Ukraine werden in Deutschland in Angeboten für Wärmepumpenanlagen deutlich höhere Preise aufgerufen als noch einige Jahre vorher. Abhängig vom Ausbau der Produktionskapazitäten und der wachsenden Qualifikation von Planern und Handwerkern ist daher mittelfristig mit etwas fallenden Preisen zu rechnen. Den vergleichsweise hohen Preisen steht zudem die Ankündigung hoher Fördersätze durch das BEG gegenüber.

### 2.3.3 Arbeitszeit für die Installation

Die Arbeitszeit für die Installation einer Wärmepumpenanlage wird vom Bundesverband Wärmepumpe mit ca. 4 bis 6 Tagen angegeben (Altermatt et al., 2023). Im Falle von Erdwärmepumpen kommt noch die Arbeitszeit für das Bohren der Erdsonde hinzu, für welche ebenfalls eine Größenordnung von insgesamt 4 bis 6 Arbeitstagen angegeben wird (Medienwerkstatt, 2023).

Deutlich schneller geht die Montage einer Klimaanlage mit einem Innen- sowie Außengerät. Sie dauert in der Regel nur ca. 4 - 5 Stunden (Paetzold, 2023). Die Arbeit kann aber auch deutlich länger dauern, wenn leistungsstarke Anlagen montiert werden oder aufwendige Fräsarbeiten oder eine Dachmontage notwendig sind.

Vorbereitende Arbeiten wie das Erstellen von Wanddurchbrüchen oder -bohrungen können grundsätzlich auch Do-it-yourself vorgenommen werden. Die Installation, Wartung, Instandhaltung, Reparatur oder Stilllegung von kältetechnischen Anlagen wie Wärmepumpen und Klimaanlage mit fluorierten Treibhausgasen (F-Gasen) muss nach der Verordnung (EU) Nr. 517/2014 durch zertifiziertes

Fachpersonal mit „Kälteschein“ vorgenommen werden. Für die Montage von Wärmepumpen mit natürlichen Kältemitteln ist dagegen kein „Kälteschein“ erforderlich.

Dies gilt analog für den elektrischen Anschluss von Wärmepumpen. Klimaanlage mit Schuko-Stecker dürfen dagegen von jedermann elektrisch angeschlossen werden.

### 2.3.4 Kältemittel

Die EU-Verordnung Nr. 517/2014 über fluorierte Treibhausgase, kurz F-Gase-Verordnung, schreibt eine kontinuierliche Reduktion des klimaschädlichen Potenzials von Kältemitteln vor. 2020 traten Verwendungsverbote für Kältemittel in Kraft, deren Global Warming Potential (GWP) das 2.500-fache von CO<sub>2</sub> (GWP-Wert 1) übersteigt. Ab 2025 werden Kältemittel mit einem GWP von über 750 verboten. Gegenwärtig werden mehr und mehr Wärmepumpen mit natürlichen Kältemitteln angeboten, also z.B. Ammoniak (R-717, GWP-Wert 0), Kohlendioxid CO<sub>2</sub> (R-744, GWP-Wert 1), Wasser (R-718, GWP-Wert 0), Isobutan (R600a, GWP-Wert 3) und Propan (R290, GWP-Wert 3). In Zukunft wird also die oftmals angeführte Klimaschädlichkeit des Kältemittels kein Argument gegen Wärmepumpen mehr sein. Für Arbeiten an Kälteanlagen mit diesen Kältemitteln ist auch kein Kälteschein erforderlich.

Der BWP (2023a) sieht in der Branche einen klaren Trend zu natürlichen Kältemitteln, besonders im Segment der Ein- und Zweifamilienhäuser. Durch den seit Beginn dieses Jahres angebotenen BEG-Förderbonus von 5 Prozentpunkten für den Einbau von Wärmepumpen mit natürlichen Kältemitteln erwartet der BWP eine schnell steigende Nachfrage nach Wärmepumpen mit diesen Kältemitteln (BWP e.V., 2023a). Der reale Marktanteil scheint aber im Sommer 2023 noch überschaubar zu sein.

### 2.3.5 Lieferfähigkeit der Branche

Der Bundesverband Wärmepumpe bezeichnet es als völlig falsch, dass das Fachhandwerk nicht fit für den Einbau von 500.000 Wärmepumpen im Jahr 2024 sein wird. Es ist dabei aber auch nicht so, dass die Umstellung nicht mit massivem Aufwand für die Betriebe verbunden ist (BWP e.V., 2023b).

Während junge Installateure seit 2022 im dritten Lehrjahr einen sehr hohen Wärmepumpen-Anteil in der Lehre haben und damit teilweise fitter aus der Lehre gehen als ihr Meister, müssen Meister und Gesellen „bei voller Fahrt“ umschulen. Hersteller und die Handwerksinstitutionen tun viel für die Weiterbildung. Allein die Hersteller stellen in 2023 ganze 60.000 Schulungsplätze zur Qualifikation für Wärmepumpen zur Verfügung. Der Verein Deutscher Ingenieure (VDI) und Bundesverband Wärmepumpe (BWP) schulen in diesem Jahr tausende Planerinnen und Planer und Meisterinnen und Meister in der richtigen Planung und Dimensionierung von Wärmepumpen (BWP e.V., 2023b).

Trotzdem ist das nicht mit einem Fingerschnips getan, das ist harter Einsatz von allen Beteiligten, und er braucht auch noch über das Jahr 2024 hinaus Zeit, bis alle sicher und erfahren in der Planung und im Einbau einer Wärmepumpe sind (BWP e.V., 2023b).

### 3 Wärmepumpen in den Szenarien der Wärmeversorgung

In den letzten Jahren sind zahlreiche Studien zur Entwicklung der Energieversorgung angefertigt worden. Das Energiewirtschaftliche Institut an der Universität zu Köln hat ausgewählte Szenarien aus fünf dieser Arbeiten vergleichend dargestellt (Gierkink et al., 2022). Der Vergleich umfasst die Studien

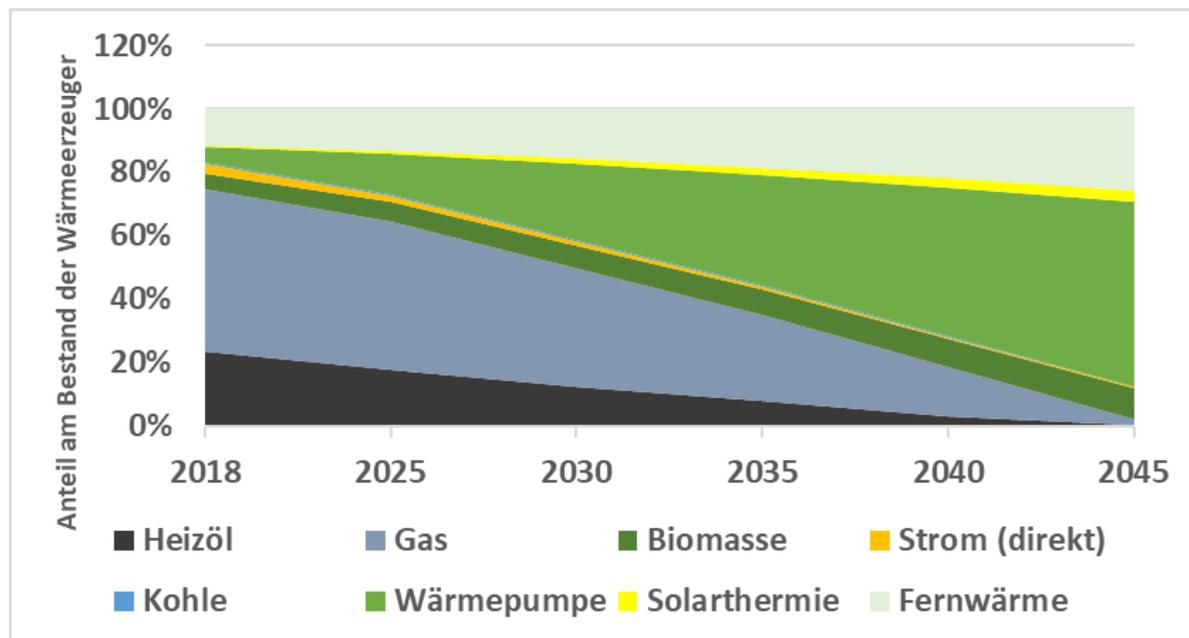
- ▶ „Klimaneutrales Deutschland 2045“ von Stiftung Klimaneutralität, Agora Energiewende und Agora Verkehrswende (Dambeck et al., 2021),
- ▶ „Klimapfade 2.0 – Ein Wirtschaftsprogramm für Klima und Zukunft“ des BDI (BCG, 2021),
- ▶ die dena-Leitstudie „Aufbruch Klimaneutralität“ (Dena, 2021),
- ▶ die „Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland 3“ des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) (Sensfuß, 2022) sowie
- ▶ der Ariadne-Report „Deutschland auf dem Weg zur Klimaneutralität 2045“ des vom Bundesministerium für Wirtschaft und Forschung (BMBF) geförderten Kopernikus-Projekts Ariadne (Ariadne Projekt, 2021).

Diese fünf Studien sowie der vorliegende Vergleich (Gierkink et al., 2022) stellen die Basis für einen Blick auf die zukünftige Entwicklung der Wärmeversorgung der privaten Haushalte und die Rolle der Wärmepumpe dabei dar. Die folgenden Grafiken und Texte basieren auf der Datentabelle des Szenarienvergleichs, die dankenswerterweise öffentlich verfügbar ist (Ariadne Projekt, 2022). Bei den Grafiken wird dabei auf die Studie „Klimaneutrales Deutschland 2045“ der Stiftung Klimaneutralität, Agora Energiewende und Agora Verkehrswende (Dambeck et al., 2021) zurückgegriffen, da diese im Gegensatz zu den anderen lückenlose Daten in Fünfjahresabständen von 2025 bis 2045 aufweist und zusätzlich das Referenzjahr 2018 dokumentiert. Dies ist bei den anderen Szenarien nicht gegeben.

#### 3.1 Wärmepumpen in Wohngebäuden

Gegenwärtig sind die Gasheizung, mit der ca. 50 % aller Wohnungen bundesweit beheizt werden, und die Ölheizung in knapp 24 % der Wohnungen sowie der Fernwärmeanschluss in 14 % der Wohnungen die bestimmenden Wärmetechnologien. Die Studie „Klimaneutrales Deutschland 2045“ der Stiftung Klimaneutralität, Agora Energiewende und Agora Verkehrswende (Dambeck et al., 2021) legt eine kontinuierlich sinkende Zahl von Öl- und Gasheizungen zugrunde und ersetzt diese primär durch eine steigende Zahl von Wärmepumpen und Fernwärmeanschlüssen.

Abbildung 5: Entwicklung des Bestandes an Wärmeerzeugern in Deutschland bis 2045



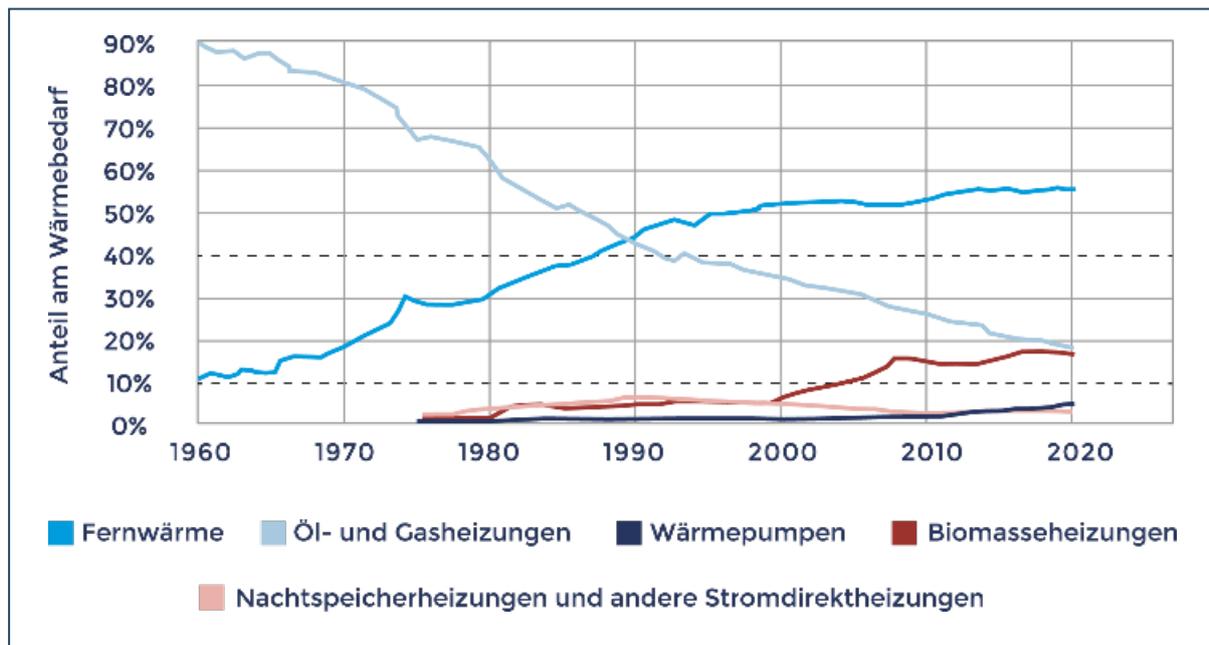
Quelle: Ariadne-Projekt (2022)

Auch die anderen Szenarien gehen übereinstimmend von einer sehr hohen Bedeutung der Wärmepumpe für die zukünftige Versorgung von Wohngebäuden aus. Im Mittel schätzen sie einen Versorgungsgrad aller Wohnungen mit Wärmepumpe von 59 %. Die niedrigste Schätzung findet sich mit 42 % in der dena-Leitstudie (Dena, 2021), die anderen Studien schätzen 58 % (Dambeck et al., 2021), 60 % Ariadne (Ariadne Projekt, 2021), 66 % (BCG, 2021) und 69 % (Sensfuß, 2022).

In nur 22 Jahren soll bis 2045 der Bestand an Öl- und Gasheizungen von über 70 % auf nur noch knapp 10 % gesenkt werden. Ein Blick auf die letzten 60 Jahre der Wärmewende in Dänemark zeigt, dass dort für ein Absinken des Bestandes an Öl- und Gasheizungen von 70 % auf 20 % ca. 45 Jahre benötigt wurden. Der deutsche Plan, dies in etwas mehr als 20 Jahren zu schaffen, kann insoweit als anspruchsvoll bezeichnet werden.

Es ist zu erwarten, dass viele kommunale Wärmepläne von einem hohen Anteil von mit Wärmepumpe beheizten Gebäuden ausgehen werden. In Orten ohne Fernwärmeversorgung wird dieser Prozentsatz besonders hoch liegen.

Abbildung 6: Anteil des dänischen Wärmebedarfs, der 2020 durch verschiedene Energieträger gedeckt wurde



Quelle: Scientists for Future (2022b)

Hilfreich für den Plan ist, dass die Zahl der installierten Wärmepumpen seit einigen Jahren deutlich steigt und besonders durch die seit dem Jahr 2019 verbesserten Förderbedingungen im Jahr 2022 erstmals knapp 280.000 Stück, davon 236.000 Heizungswärmepumpen, erreichte. Jeder vierte installierte Wärmeerzeuger war 2022 eine Wärmepumpe. Im ersten Quartal 2023 stieg die Zahl der von den Herstellern an die Installationsbetriebe ausgelieferten Heizungswärmepumpen auf fast 100.000 (TGA Fachplaner, 2023). Das Ziel, in 2024 dann 500.000 Wärmepumpen auszuliefern, rückt damit in greifbare Nähe.

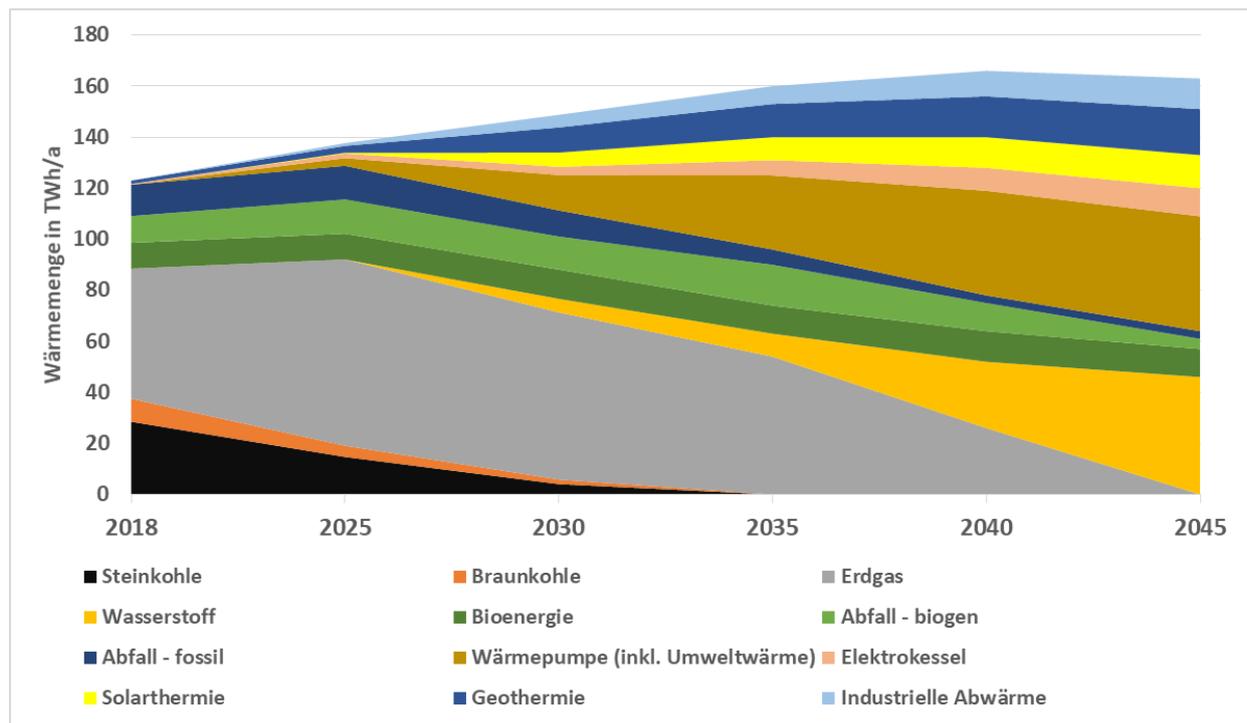
### 3.2 Zukünftige Wärmequellen der Fernwärmeerzeugung

Abbildung 5 zeigte schon, dass ein erheblicher Teil der Gebäude in Zukunft über Wärmenetze mit Wärme versorgt werden wird. Sind dies heute noch ca. 12 %, so sagen die Szenarien eine Steigerung auf 17 %, 22 %, 26 % oder gar 35 % voraus. Nur eine Studie erwartet einen Rückgang auf 8 %.

Auch der größte Teil der Fernwärme wird gegenwärtig noch fossil erzeugt. Auch hier muss die Verwendung von Kohle, Gas und Öl schnell beendet werden. So ist es erforderlich, neue und regenerative Quellen für die Fernwärmeversorgung zu erschließen. Schon heute wird Bioenergie sowie biogener und fossiler Abfall in Verbrennungsanlagen eingesetzt, um Fernwärme zu erzeugen. Die Studie „Klimaneutrales Deutschland 2045“ (Dambek et al., 2021) zeichnet das Bild eines sich langsam von den Fossilen weg entwickelnden, recht differenzierten Wärmemixes.

In den kommunalen Wärmeplänen muss festgelegt werden, ob ein Wärmenetz neu gebaut oder ausgebaut werden soll.

Abbildung 7: Entwicklung der Fernwärmeerzeugung in Deutschland bis 2045



Quelle: Ariadne-Projekt (2022)

Wärmepumpen stellen in diesem Szenario in 2045 ganze 27 % der gesamten Fernwärme bereit<sup>3</sup>. Der Anteil fossiler Energieträger liegt heute noch bei 81 % und soll bis 2045 bis auf einen kleinen Anteil „Abfall-fossil“ komplett durch einen breiten Mix erneuerbarer Energien ersetzt werden. Im Vergleich mit drei weiteren Szenarien, die die Fernwärmegewinnung im Detail ausarbeiten, enthält der 2045-Mix der Studie „Klimaneutrales Deutschland 2045“ eher viel Wasserstoff, und im Vergleich zur BDI Studie Klimapfade 2.0 weniger Biomasse. In Bezug auf die anderen Energiequellen bestehen zwar Unterschiede, gemeinsam ist allen Studien aber ein breiter Mix unterschiedlicher Wärmequellen. Lokal wird dieser Mix dann im Regelfall fokussierter, weil er sich an den lokalen Gegebenheiten orientieren muss. So können z.B. industrielle Abwärme oder Flusswärmepumpen nur dort genutzt werden, wo entsprechende Ressourcen verfügbar sind.

Die Studie „Roll-out von Großwärmepumpen in Deutschland“ (Agora Energiewende & Fraunhofer IEG, 2023) prognostiziert eine noch deutlich höhere Bedeutung von Großwärmepumpen in Wärmenetzen. In ihrem T45 Szenario erwartete sie in 2030 immerhin 80 bis 100 TWh/a Wärme aus Wärmepumpen in Wärmenetzen, in 2040 sogar 120 bis 140 TWh/a. Wärmepumpen würden dann den mit Abstand größten Anteil der Fernwärme produzieren.

Kommunale Wärmepläne sollten die verstärkte Nutzung von Biomasse und Wasserstoff nur einplanen, wenn vertraglich gesicherte Mengen zur Bedarfsdeckung vorhanden sind. Wärmepumpen könnten dagegen deutlich größere Potenziale bieten als allgemein vermutet.

<sup>3</sup> In anderen Szenarien werden für den Anteil von Wärmepumpen an den Wärmequellen von Wärmenetzen Werte von 19 %, 24 %, 25 % und 68 % genannt.

## WÄRMEPUMPEN IN DER WÄRMEPLANUNG

Es sei an dieser Stelle noch darauf hingewiesen, dass zwei populäre Alternativen bei professioneller Planung sehr kritisch betrachtet werden sollten. Dies sind zum einen die Heizung mit Biomasse, die vom heutigen Wert von 5 % des Wärmebedarfs bis 2045 je nach Szenario auf 6 %, 8 %, 9 % oder 10 % steigt oder sogar auf 0 % fällt. Keines der Szenarien sagt ein starkes Ansteigen voraus. Einschlägige Studien weisen auf die durch den Klimawandel deutlich absehbaren Versorgungsengpässe hin (Scientists for Future, 2022a). Und auch der Wasserstoff, der in den Szenarien für dezentrale Heizungen überhaupt nicht berücksichtigt wurde, wird wohl nur bei der Versorgung von Residuallastkraftwerken eine Rolle spielen (Scientists for Future, 2022d). Rosenow (2023) weist im Focus gleich auf 30 unabhängige Studien hin, die zeigen, dass das Beheizen von Häusern mit Wasserstoff deutlich teurer, weniger effizient und umweltschädlicher ist als die vorhandenen Alternativen.

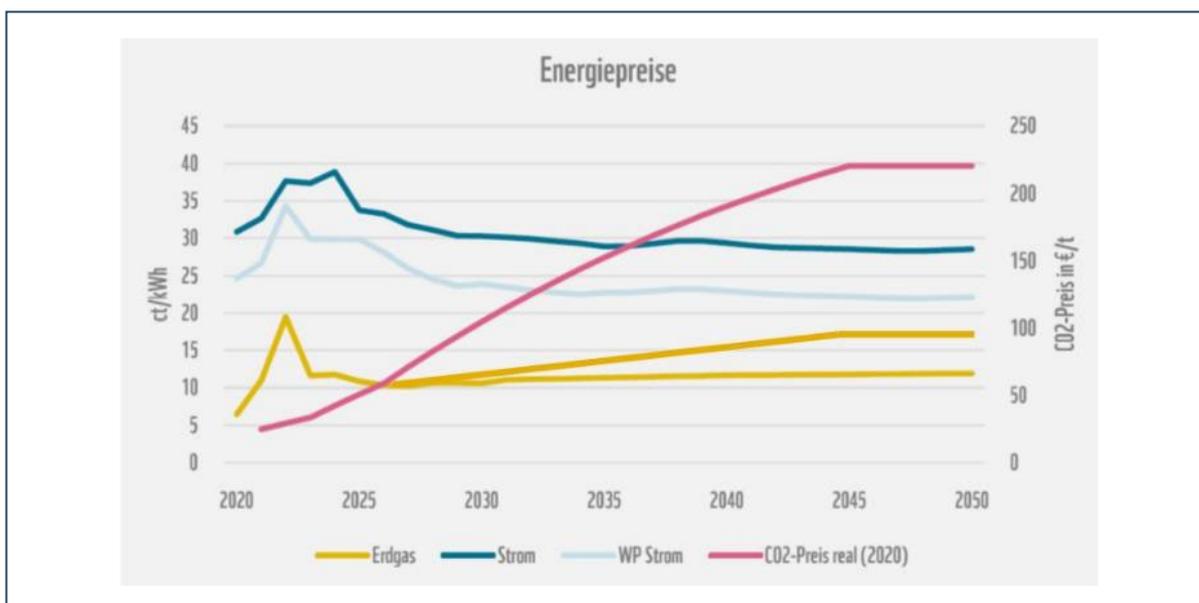
## 4 Anwendungsfelder von Wärmepumpen

Bei der Ausstattung von Neubauten mit Heizungsanlagen lag der Anteil der Wärmepumpen schon 2021 über 50 %. Da der Energiestandard neuer Gebäude aufgrund der Anforderungen des Baurechts grundsätzlich gut ist und oft auch eine Flächenheizung eingebaut wird, stellt der Einbau einer Wärmepumpe in Neubauten keinerlei Schwierigkeit mehr dar. In Neubaugebieten sollten daher, angesichts des Ziels der Klimaneutralität in 2045 eigentlich eine Selbstverständlichkeit, keine Gasnetze mehr geplant und verlegt werden. Als problematisch gelten dagegen vielfach Bestandsgebäude. Eine ganze Reihe von Mythen existiert: Wärmepumpen funktionieren nur mit Fußbodenheizungen! Wärmepumpen funktionieren nur in gut isolierten Gebäuden! Wärmepumpen sind unerschwinglich! Alle diese Mythen sind vielfach widerlegt, halten sich aber hartnäckig.

So ist weitgehend falsch, dass eine Wärmepumpe im Altbau nur mit dicker Dämmung und Fußbodenheizung funktioniert. Die Wärmepumpe ist aber gleichzeitig auch kein Allheilmittel, das überall ohne zusätzliche Maßnahmen eine Gas- oder Ölheizung 1:1 ersetzen kann. Entscheidend ist es, die Vorlauftemperaturen über kosteneffiziente Maßnahmen der Gebäudedämmung und über ein geeignetes System der Wärmeverteilung so weit herunterzubringen, dass der wirtschaftlich und energetisch zufriedenstellende Betrieb gewährleistet werden kann. Der Austausch z.B. der schlechtesten 2 - 4 Heizkörper bringt häufig einen großen Nutzen.

Genauso ist es falsch, dass die Investition in eine Wärmepumpe jeden in den Ruin treibt. Es ist aber gewiss auch nicht so, dass eine Wärmepumpe sich immer in den ersten fünf Jahren amortisiert. Entscheidend sind die Voraussetzungen des Gebäudes und die Entwicklung der Energiepreise. Erdgas und Heizöl werden ab 2027 mit dem EU-Emissionshandel 2 deutlich teurer. Die Entwicklung des Strompreises weist mit dem Ausbau der erneuerbaren Stromerzeugung eher auf leicht sinkende Preise hin. Während noch im Jahr 2020 der Erdgaspreis oft bei ca. 6 Cent/kWh lag und der Wärmepumpenstrom das Vierfache kostete, verändert sich dies Verhältnis in der Zukunft deutlich.

Abbildung 8: Wie entwickeln sich die Energiepreise langfristig?

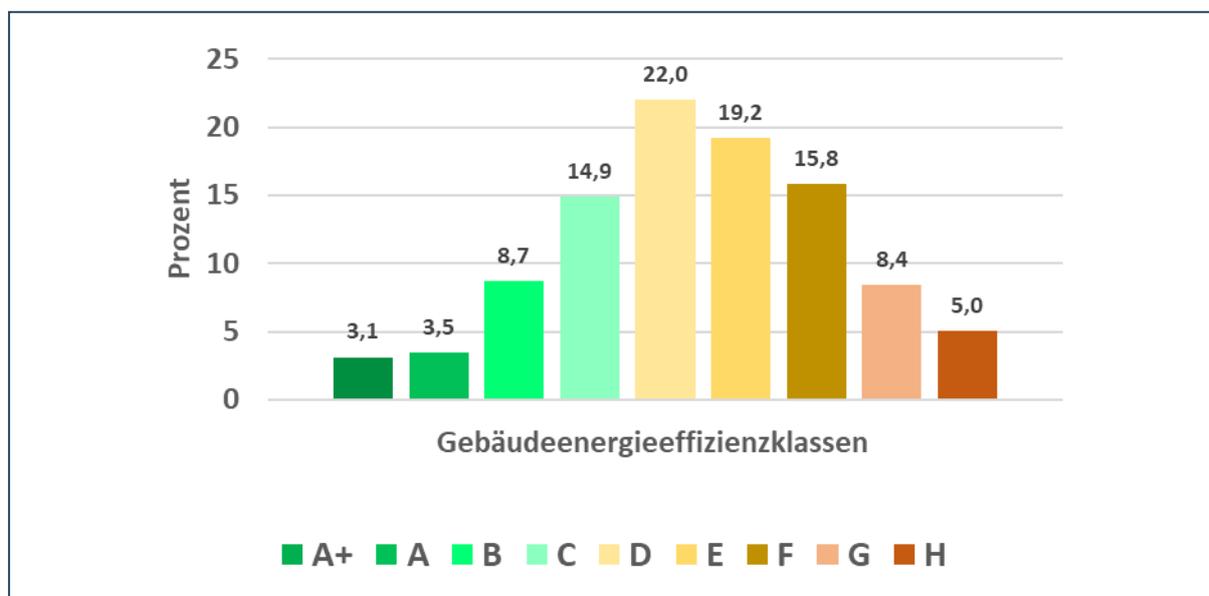


Quelle: WWF-Deutschland (2023), ergänzt um Erdgaspreis incl. CO<sub>2</sub>-Preis

Schon gegenwärtig im Herbst 2023 liegt der Erdgaspreis bei ca. 9 Cent bei Vertragsneuabschluss, Wärmepumpenstrom wird ab ca. 24 Cent/kWh angeboten<sup>4</sup>. Damit sinkt der Faktor zwischen beiden Preisen von vier auf unter 3. In den laufenden Energiekosten ist damit jede Wärmepumpe mit einer Jahresarbeitszahl über 3 kostengünstiger als eine Erdgasheizung.

Dennoch gibt es zunächst hohe Investitionskosten. Wichtig ist daher die Nutzung von Förderung und ggf. Kreditoptionen sowie eine gute Beratung. Dabei sind die Aufwände in Gebäuden mit schlechter Energieeffizienzklasse höher.

**Abbildung 9: Verteilung des witterungsbereinigten Verbrauchs für Raumheizung und Warmwasser nach Effizienzklassen**



Quelle: CO2-Online (2023), alle Bundesländer, Daten aus 2002 bis 2022, Anzahl Gebäudedaten: 1.949.348

Andere Datenbestände führen zu anderen Varianten dieser Grafik. Weber et al. (2023) weisen gezielt darauf hin, dass die Verteilung der Effizienzklassen nach Bedarfsausweisen und Verbrauchsausweisen sehr unterschiedlich ist. Während die Darstellung der Verbrauchsausweise nach Energieklassen zu einer ähnlichen wie der in Abbildung 9 gezeigten führt, verschieben sich die Anteile bei der Darstellung der Bedarfsausweise stark in Richtung auf die Effizienzklassen F, G und H. „*Ein wesentlicher Grund dafür dürfte in der systematischen Überschätzung des Energieverbrauchs durch Bedarfsausweise in schlechten Effizienzklassen liegen - in der Regel heizen Bewohner besonders ineffizienter Gebäude deutlich sparsamer, als es der Energiebedarfsweis vermuten lassen würde*“ (Weber et al., 2023).

Auch in der kommunalen Wärmeplanung gilt es zu berücksichtigen, welche Energieeffizienzklasse der jeweilige Gebäudebestand aufweist. Im Fall von Einfamilienhäusern können alle Energieeffizienzklassen bis einschließlich D (also bis zu 130 kWh/m<sup>2</sup>) grundsätzlich als auf Wärmepumpe umrüstbar

<sup>4</sup> Vgl. <https://www.verivox.de/>, Suche nach Erdgas- und Stromtarif für Haushalte.

eingestuft werden. Insgesamt entspricht das mit 52 % gut dem halben Bestand. Weniger energieeffiziente Gebäude müssen zumindest ein wenig effizienter gemacht werden, z.B. durch kostengünstige Maßnahmen wie die Dämmung von Dach- oder Kellerdecke oder dort, wo zweischalige Außenwände vorhanden sind, eine Einblasdämmung. Es ist aber nicht erforderlich, jedes Gebäude auf die Energieeffizienzklasse B ( $<75 \text{ kWh/m}^2$ ) zu sanieren. Die Klasse D ( $<130 \text{ kWh/m}^2$ ) wird in vielen Fällen ausreichen. Die „Wärmepumpenfähigkeit“ kann dann u.U. durch vergleichsweise preiswerte Maßnahmen wie Dämmung von Dach oder Kellerdecke sowie durch eine Anpassung des Wärmeverteilsystems durch z.B. größere Heizkörper hergestellt werden. Die folgenden Kapitel präsentieren einige Beispiele von mit Wärmepumpe ausgerüsteten Bestandsgebäuden sowohl für Einfamilien- wie für Mehrfamilienhäuser.

### 4.1 Einfamilienhäuser

Die folgenden Anwendungsbeispiele zielen darauf, besonders die Eignung von Wärmepumpen für die Beheizung von Gebäuden aus dem Bestand zu zeigen. Dabei werden auch die Auswirkungen auf die Höhe des Energieverbrauchs sowie die Treibhausgasemissionen und die laufenden Energiekosten gezeigt. Um diese Zahlen zeigen zu können, wurde wie folgt vorgegangen:

Die Zahlen zum **Energieverbrauch** beruhen auf Angaben der Hausbesitzenden. Der Energieverbrauch der (fiktiven) Gasheizung in Kilowattstunden wurde als gleich hoch angesetzt wie der Wärmeoutput der Wärmepumpe, also die Summe aus Strombedarf und gewonnener Umweltwärme. Durch die Gewinnung von Umweltwärme am Standort des Gebäudes ist der Bedarf an „gelieferter“ Energie mit Wärmepumpe immer deutlich geringer als mit einer Gas- oder Ölheizung.

Der **Treibhausgasfaktor** von Erdgas wurde incl. der Vorkettenemissionen aus Förderung und Transport auf ca.  $400 \text{ g CO}_2\text{eq/ kWh}$  veranschlagt (Brauers et al., 2021; Traber & Fell, 2019). Es wurde also nicht der mit Blick auf die aktuelle Klimaforschung deutlich zu geringe Wert aus dem GEG angewendet. Der Treibhausgasfaktor von Netzstrom wurde ebenfalls nicht dem in dieser Hinsicht veralteten GEG entnommen, sondern in Anlehnung an Daten des Umweltbundesamtes ebenfalls auf  $400 \text{ g CO}_2\text{eq/ kWh}$  veranschlagt (Umweltbundesamt, 2022). Der Treibhausgasfaktor von Strom aus der eigenen Photovoltaik wurde nach Gebäudeenergiegesetz zu  $0 \text{ g CO}_2\text{eq/ kWh}$  veranschlagt.

Zur Errechnung der laufenden **Energiekosten** wurde auf Basis eines Preisvergleichs im Frühjahr 2023 für eine Kilowattstunde Erdgas 10 Cent und für eine Kilowattstunde Netzstrom zum Wärmepumpentarif 30 Cent angesetzt.

#### 4.1.1 Bungalow Baujahr 2002 mit Energieeffizienzklasse C mit PV und Stromspeicher

**Gebäude und Wärmepumpe:** Das Gebäude mit Energieeffizienzklasse C  $\approx 97 \text{ kWh/m}^2$  wird mit einer NIBE Sole Wasser Wärmepumpe mit einer Leistung von 6 kW beheizt. Die Umweltwärme wird durch zwei Erdsonden mit je 75 m Tiefe gewonnen. Der kalkulierte Wärmebedarf des Hauses für Heizung und Warmwasser wird auf ca.  $13.000 \text{ kWh/a}$  veranschlagt.

**Die Energietechnik:** Das Haus ist auf drei von vier Dachflächen mit einer PV-Anlage mit einer Leistung von  $14 \text{ kW}_{\text{peak}}$  ausgestattet. Im Heizungsraum befinden sich ein Pufferspeicher, der Wechselrichter sowie ein Stromspeicher mit einer Speicherkapazität von  $13,5 \text{ kWh}$ . Der Heizwärmeverbrauch des ersten Betriebsjahres (8/2021 bis 8/2022) betrug ca.  $10.000 \text{ kWh}$  zzgl.  $3.400 \text{ kWh}$  Warmwasser, der Stromverbrauch der Wärmepumpe lag bei  $3.000 \text{ kWh/a}$ . Die Jahresarbeitszahl (JAZ) lag bei 4,4. Vom

## WÄRMEPUMPEN IN DER WÄRMEPLANUNG

Wärmepumpenstrom konnten ca. 60 % mit PV und Stromspeicher selbst produziert werden, nur 1.200 kWh mussten beim Stromversorger zugekauft werden.

Abbildung 10: Bungalow in Hannover, Energieverbrauch, Treibhausgasemissionen und Kosten



Quelle: Foto: Clausen, Grafiken Borderstep

### 4.1.2 Reihendhaus Baujahr 1968 mit Energieeffizienzklasse D mit PV und Wallbox

**Gebäude und Wärmepumpe:** Vor dem Haus mit Energieeffizienzklasse D  $\approx 120 \text{ kWh/m}^2$  aufgestellt ist eine M-TEC Luft-Wasser Wärmepumpe Baujahr 2018 mit einer maximalen Leistung von 12 kW und einer saisonalen Arbeitszahl (SCOP) von 3,66. Aus jeder Kilowattstunde Strom entstehen so im Schnitt 3,66 kWh Wärme. Die Wärmepumpe bedient zwei getrennte Heizkreise für die Heizkörper und für die Fußbodenheizung. Es ist ein Pufferspeicher verbaut, aber kein Heizstab.

**Die Energietechnik:** Das Haus ist mit einer  $10 \text{ kW}_{\text{peak}}$  PV-Anlage (zwei Dachflächen und Fassade) und Wallbox für das Elektroauto ausgestattet. Die Anlage wird durch ein digitales Energiemanagement gesteuert. Ein Stromspeicher ist noch nicht eingebaut. Der Strombedarf für alle Anwendungen wird zu etwa 30 % durch die PV-Anlage gedeckt. So werden von den 5.000 kWh/a, die die Wärmepumpe verbraucht, nur ca. 3.300 kWh/a vom Stromversorger zugekauft. Ca. 1.700 kWh/a werden selbst erzeugt. Durch die geplante Investition in einen Stromspeicher (Q2-2023) soll der Selbstversorgungsgrad auf ca. 60 % gesteigert werden.

Abbildung 11: Reihenhendhaus, Energieverbrauch, Treibhausgasemissionen und Kosten



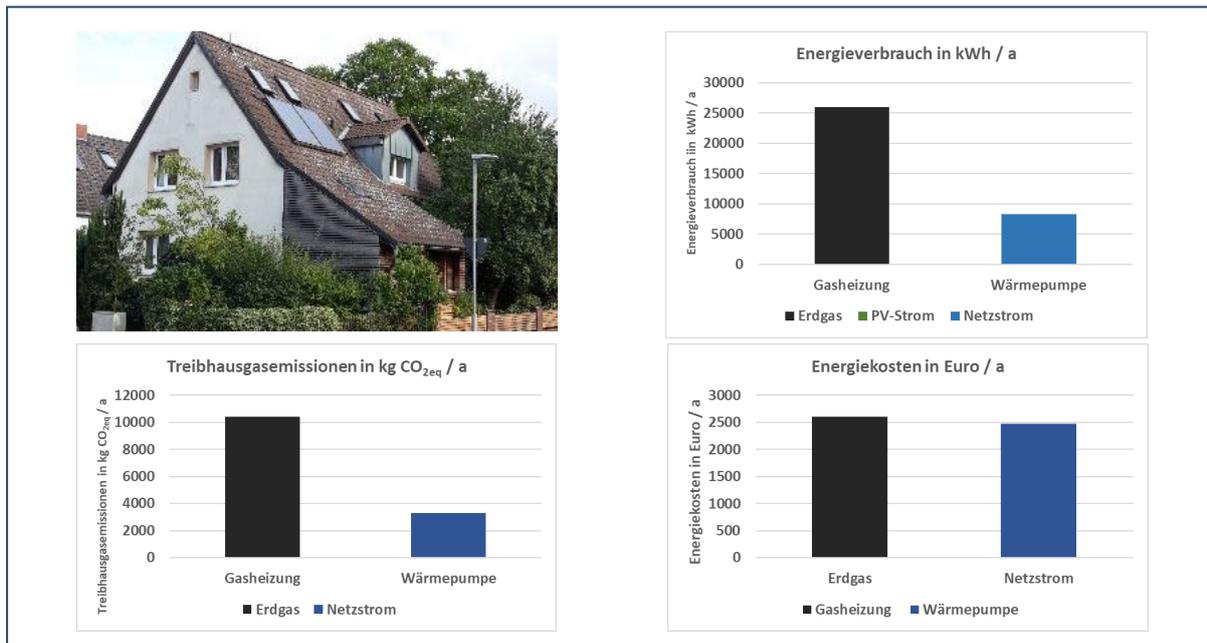
Quelle: Foto: Schmidt, Grafiken Borderstep

#### 4.1.3 Siedlungshaus Baujahr 1952 mit Energieeffizienzklasse E

**Gebäude und Wärmepumpe:** Vor dem Haus mit Energieeffizienzklasse E  $\approx 144 \text{ kWh/m}^2$  aufgestellt ist eine zweistufige alpha innotec Luft-Wasser Wärmepumpe LW 190 MA, Baujahr 2009 mit einer maximalen Leistung von 11 kW / 18,5 kW, einem Schalldruckpegel von 57 dB(A), einer maximalen Vorlauftemperatur von 60 °C und einer Jahresarbeitszahl (JAZ) von 3,1. Aus jeder Kilowattstunde Strom entstehen so im Schnitt 3,1 kWh Wärme. Die Wärmepumpe bedient zwei getrennte Heizkreise für die Heizkörper und für die in zwei Räumen vorhandene Fußbodenheizung. Die Wärmepumpe wurde mit Büschen umpflanzt, um sie weniger sichtbar zu machen in der Hoffnung, dass auch die Schallemissionen in der Nachbarschaft dann nicht so bewusst wahrgenommen werden. Das scheint zu funktionieren.

**Die Energietechnik:** Das Haus ist zusätzlich mit einem solarthermischen Flächenkollektor (5 m<sup>2</sup>) und einem Pufferspeicher ausgestattet. Der durchschnittliche Wärmeverbrauch der letzten Jahre betrug ca. 26.000 kWh/a, der durchschnittliche Stromverbrauch der Wärmepumpe lag bei 8.250 kWh/a.

Abbildung 12: Siedlungshaus, Energieverbrauch, Treibhausgasemissionen und Kosten



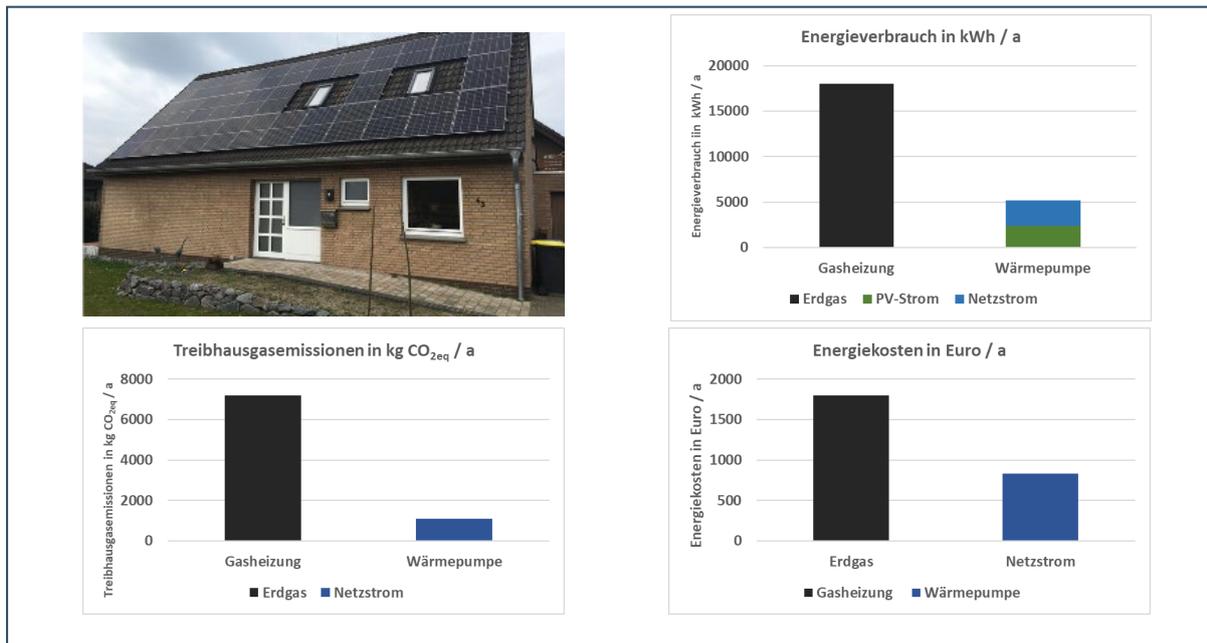
Quelle: Foto: Clausen, Grafiken Borderstep

#### 4.1.4 Einfamilienhaus von 1977 mit Energieeffizienzklasse F mit PV und Stromspeicher

**Gebäude und Wärmepumpe:** Vor dem Haus mit Energieeffizienzklasse F  $\approx 163 \text{ kWh/m}^2$  aufgestellt ist eine Viessmann Luft-Wasser Wärmepumpe, die wirklich leise ist. Das Baujahr der Wärmepumpe ist 2022. Sie hat eine maximale Leistung von 11 kW und einer saisonalen Arbeitszahl (SCOP) von 3,5. Aus jeder Kilowattstunde Strom entstehen so im Schnitt 3,5 kWh Wärme. Das Haus wurde nach der 1. Wärmeschutzverordnung von 1977 errichtet und verfügt über eine 60 mm Hohl-schichtdämmung sowie eine Dämmung des Daches mit 120 mm Glaswolle. Die Wärmeverteilung erfolgt über Heizkörper, von denen drei für den Wärmepumpenbetrieb vergrößert wurden.

**Die Energietechnik:** Das Haus ist mit einer 10,9 kW<sub>peak</sub> PV-Anlage und einem 12 kWh Stromspeicher ausgestattet. Der Strombedarf für die Wärmepumpe wird zu etwa 45 % durch die PV-Anlage gedeckt. So werden von den 5.200 kWh/a, die die Wärmepumpe verbraucht, nur ca. 2.800 kWh/a vom Stromversorger zugekauft.

Abbildung 13: Einfamilienhaus, Energieverbrauch, Treibhausgasemissionen und Kosten



Quelle: Foto: Stakemeier, Grafiken Borderstep

## 4.1.5 Fazit Einfamilienhäuser

Die Treibhausgasemissionen der hier vorgestellten Häuser sind im Vergleich zur Gasheizung sehr niedrig. Die Verbreitung der Wärmepumpe kann daher als eine für den Klimaschutz hochgradig wirksame Maßnahme eingestuft werden. Dies wird besonders dann deutlich, wenn die Treibhausgasemissionen aus dem Gasverbrauch nicht nur die Verbrennung des Erdgases, sondern auch die hohen Vorkettenemissionen berücksichtigen.

Der im Vergleich zum Gaspreis hohe Strompreis wird immer dann weniger wichtig, wenn auf selbst erzeugten und damit preiswerten PV-Strom zugegriffen werden kann. Bei ausschließlichem Netzstrombezug sind die laufenden Energiekosten dagegen oft kaum niedriger als mit einer Gasheizung.

Für die Wärmeplanung können einige Erkenntnisse festgehalten werden:

- ▶ Die Förderung der Verbreitung von Wärmepumpen ist aufgrund des Ziels der Klimaneutralität von höchster Bedeutung,
- ▶ Wärmepumpen sind schon heute für Gebäude mit den Energieeffizienzklasse A+ bis D geeignet und verfügbar. Gebäude der Energieeffizienzklasse E und F sollten ein wenig, Gebäude mit den Energieeffizienzklasse G und H aufwendiger saniert werden, um „fit für die Wärmepumpe“ zu werden.
- ▶ Für die notwendige Sanierung wird gegenwärtig durch die Europäische Union eine allerdings noch stark umstrittene Vorschrift erarbeitet, nach der alle Wohngebäude der Klasse G bis 2030 die Klasse F und bis 2033 die Klasse E erreichen müssen (European Parliament, 2023). Sollte diese Vorschrift Gültigkeit erlangen, würden in den

Die Umrüstung von Gebäuden von Gas- oder Ölheizung auf Wärmepumpe und die Sanierung wenig effizienter Gebäude ergänzen sich gut. Nach der Sanierung ist das Gebäude dann „fit für die Wärmepumpe.“

nächsten 10 Jahren quasi alle Gebäude auf einen Energiestandard saniert werden müssen, der für eine Wärmepumpe grundsätzlich tauglich ist.

## 4.2 Mehrfamilienhäuser

### 4.2.1 Eigentümergeinschaft in Berlin Schöneberg in Haus von 1890

**Gebäude und Wärmepumpe:** Die beheizte Fläche der 30 Wohnungen des 1890 errichteten Gebäudes beträgt ca. 2.300 m<sup>2</sup>. Das Haus wurde vor der Umrüstung auf Hybridheizung über eine Brennwert-Gaszentralheizung mit Standard-Heizkörpern beheizt. Der Wärmeverbrauch lag bei 95 kWh/m<sup>2</sup> in der Energieeffizienzklasse C, womit das Haus zum effizientesten Drittel des Mehrfamilienhausbestandes gehört (Mellwig, 2021). Zusätzlich zur vorhandenen Brennwert-Gasheizung wurde eine Sole-Wasser-Wärmepumpe mit 35 kW Leistung eingebaut. Als Wärmequelle dienen sechs Doppel-U-Erdwärmesonden zu je 99 m. Die Gesamtkosten der Umrüstung (Bohrung, Wärmepumpe, Montage, Elektrik, Neugestaltung des Hofes) beliefen sich auf 97.400 € und damit auf ca. 3.000 € pro Wohnung. Das Projekt erhielt vom BAFA eine Förderung in Höhe von 35 %. Die Planung erfolgte in Eigenleistung. Das Ziel, den Gasverbrauch um die Hälfte zu senken wurde erreicht. Die Standard-Heizkörper wurden nicht verändert. Die Betriebsdaten werden online erfasst, sodass die Effizienz der Anlage mit einer Jahresarbeitszahl von 3,8 valide nachvollziehbar ist.

Abbildung 14: Eigentümergeinschaft, Energieverbrauch, Treibhausgasemissionen und Kosten



Quelle: Foto: BWP, Grafiken Borderstep

Aufgrund des durch die Hybridheizung genutzten Erdgases sinkt die Menge der eingekauften Energie wie auch die Treibhausgasemissionen weniger deutlich als bei reinen Wärmepumpenheizungen.

## WÄRMEPUMPEN IN DER WÄRMEPLANUNG

Durch den im Vergleich zum Erdgas hohen Strompreis fällt die Einsparung bei den laufenden Energiekosten nur klein aus.

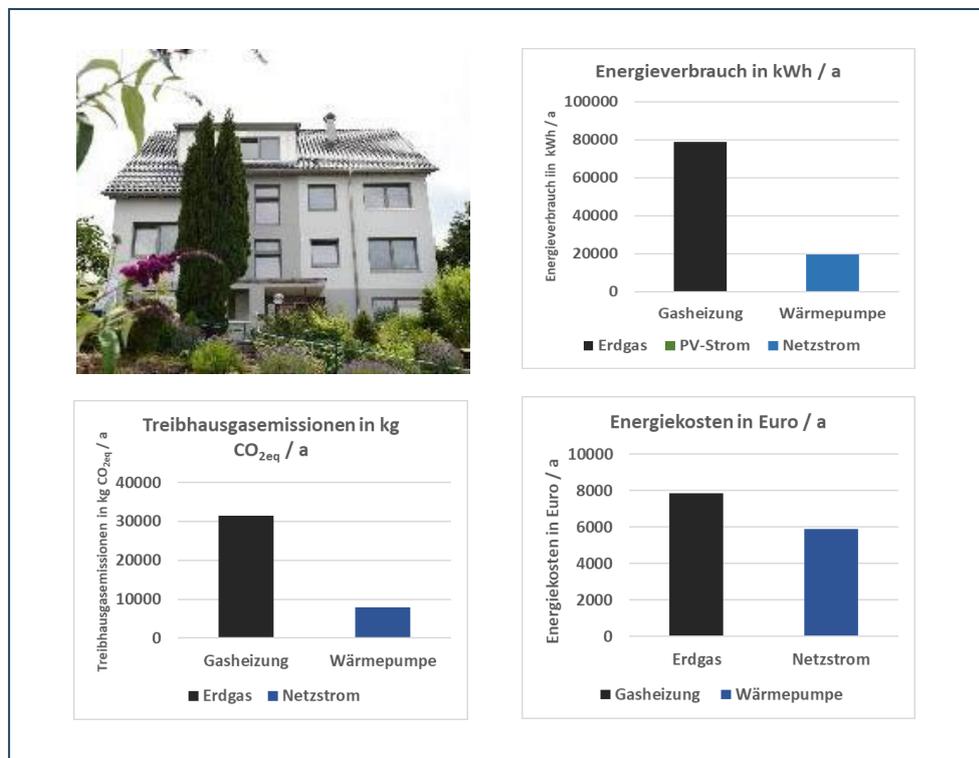
### 4.2.2 Mehrfamilienhaus bei Stuttgart von 1960

**Gebäude und Wärmepumpe:** In einem Mehrfamilienhaus bei Stuttgart aus dem Jahr 1960 waren drei Wohnungen, die zusammen eine beheizte Fläche von ca. 340 m<sup>2</sup> hatten. Vor der Sanierung betrug der jährliche Verbrauch ca. 8.000 Liter Heizöl, also ca. 80.000 kWh, was Energieeffizienzklasse G oder ca. 230 kWh/m<sup>2</sup> entspricht (Nick, 2023).

Im Gebäude wurde im Jahr 2010 eine Luft-Wasser Wärmepumpe mit einer Heizleistung von 30 kW installiert. Im Jahr 2012 wurde zusätzlich eine Solarthermieanlage installiert, die zur Warmwasserbereitung genutzt wird und die Heizung unterstützt. Zusätzlich speist die Solarthermie Wärme direkt in den Kältekreis ein, wenn die solare Wärme für die direkte Nutzung nicht mehr warm genug ist. Nach dieser Maßnahme lag die Jahresarbeitszahl (JAZ) schon bei 3,3.

In den folgenden Jahren ließ der Besitzer neue Fenster einsetzen, die Fassade dämmen (20 cm) sowie das Dach anheben und dämmen. Mit diesen Sanierungsmaßnahmen wurde das Drei- zu einem Vier-Parteien-Haus umgebaut und in den vergangenen Jahren auf den Stand eines KfW85-Gebäudes entsprechend Energieeffizienzklasse B gebracht. Nach Abschluss der Sanierungsarbeiten beträgt die Heizlast für die jetzt 400 m<sup>2</sup> lediglich 18kW und die Jahresarbeitszahl verbessert sich auf ca. 4.

Abbildung 15: Mehrfamilienhaus, Energieverbrauch, Treibhausgasemissionen und Kosten



Quelle: Foto: BWP, Grafiken Borderstep

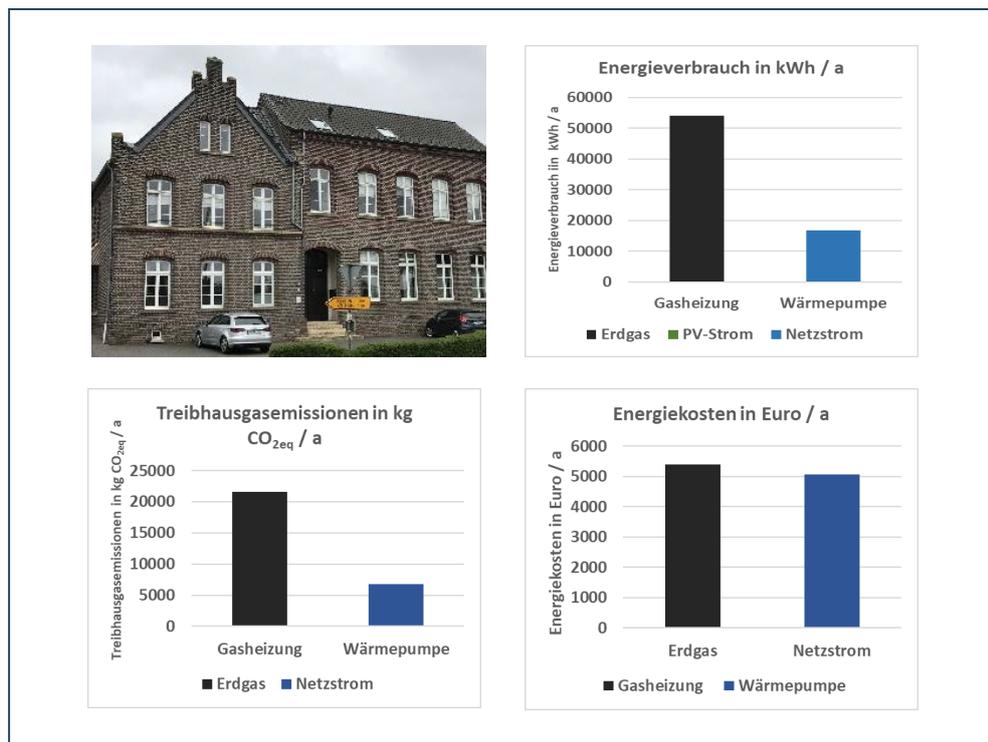
Aufgrund der guten Arbeitszahl der Wärmepumpe sinkt die Menge der eingekauften Energie genauso deutlich wie die Treibhausgasemissionen. Durch den im Vergleich zum Erdgas hohen Strompreis fällt die Einsparung bei den laufenden Energiekosten nur klein aus.

### 4.2.3 Alte Dorfschule am Niederrhein von 1881

**Gebäude und Wärmepumpe:** Die Alte Dorfschule wurde 1881 gebaut. Nachdem das Gebäude im Jahr 1910 aufgestockt wurde zog die Schule 1966 in ein neues Schulzentrum um. Zwischenzeitlich diente die ehemalige Dorfschule dann als Kirche, Gemeindeverwaltung und Jugendheim. Das Schulgebäude wurde 2008 in ein Mehrfamilienhaus mit 5 Wohnungen mit einer Wohnfläche von zusammen 470 m<sup>2</sup> verwandelt.

Berechnungen des Heizungsbauers zeigten, dass die Gebäudeheizlast mit einem Niedertemperaturheizsystem nur mit Innendämmung einiger Bauteile erreicht werden konnte. Diese Dämmung wurde ausgeführt und die Wärmeverteilung im Haus übernimmt eine Fußbodenheizung mit besonders niedrigen Aufbauhöhe und daher geringem Gewicht. So können die originalen Holzbalkendecken des denkmalgeschützten Gebäudes die Fußbodenheizung problemlos tragen. Gleichzeitig wird eine höhere Wärmestrahlungsleistung erreicht. Auch nach der Sanierung erreicht das Gebäude aber nur die Energieeffizienzklasse D bei einem Wärmebedarf von ca. 115 kWh/m<sup>2</sup>.

Abbildung 16: Alte Dorfschule, Energieverbrauch, Treibhausgasemissionen und Kosten



Quelle: Foto: BWP, Grafiken Borderstep

Zur Wärmeversorgung wurde eine alpha innotec Luft-Wasser-Wärmepumpe mit einer Leistung von 33 kW sowie ein Warmwasserspeicher eingebaut. Die Fußbodenheizung inkl. der notwendigen Dämmung wurde auf Wunsch des Bauherrn in Eigenarbeit verlegt und dann durch den Heizungsbauer

angeschlossen und in Betrieb genommen. Die Luftwärmepumpe läuft mit einer Jahresarbeitszahl (JAZ) von ca. 3,2.

### 4.2.4 Etagenwohnung in Dresden

Eine kleine Dachgeschoss-Mietwohnung mit einer Wohnfläche von 72 m<sup>2</sup> wurde bisher mit Fernwärme beheizt, die in Dresden bisher nur zu 0,6 % auf der Nutzung erneuerbarer Brennstoffe beruht (TU Dresden, 2020). Der Bewohner entschied sich daher im Laufe des Jahres 2022 zusätzlich zu seinem Fernwärmeanschluss eine Luft-Luft Wärmepumpe (Klimaanlage) zu installieren (Athenstaedt, 2023). Der Wärmeverbrauch im Jahr 2021 mit reiner Fernwärmeversorgung lag bei ca. 3.300 kWh, auf die Fläche bezogen sind das 45 kWh/m<sup>2</sup> und die Energieeffizienzklasse A.

**Abbildung 17: Luft-Luft Wärmepumpe in einer Etagenwohnung**



Quelle: Athenstaedt

Im November 2022 erfolgte die Installation einer Luft-Luft Wärmepumpe mit dem Ziel, die Nutzung der Fernwärme zu reduzieren. Durch den Einsatz intelligenter Steckdosen konnte seither der Stromverbrauch steckdosenscharf für die Wärmepumpe gemessen werden und wurde monatlich erfasst. Auch der Fernwärmeverbrauch wurde monatlich notiert (Athenstaedt, 2023). Hochgerechnet auf das ganze Jahr ergäbe sich zukünftig ein Heizenergieverbrauch (Fernwärme + Strom) von ca. 720 kWh, was auf die Fläche bezogen 10 kWh/m<sup>2</sup> und der Energieeffizienzklasse A+ entsprechen würde.

Die hohe Einsparung an zugeführter Wärme lässt sich sowohl durch den COP-Wert der Luft-Luft Wärmepumpe wie auch durch das im Winter 2022 / 2023 hohe Bewusstsein für die Notwendigkeit von Einsparungen erklären. Durch das Ziel des Bewohners, möglichst viel Wärme aus seiner Photovoltaikanlage zu nutzen, wurde die Luftwärmepumpe gezielt tagsüber betrieben. Am Morgen war es in der Wohnung daher manchmal kälter als früher (Athenstaedt, 2023). Ein grundsätzlich geändertes Heizverhalten hat der Bewohner dagegen bei sich selbst nicht wahrgenommen. 20 bis 21 °C wurden eigentlich immer überall erreicht.

### 4.2.5 Fazit Mehrfamilienhäuser

Es deutet vieles darauf hin, dass der Einbau von Wärmepumpen in Mehrfamilienhäusern öfter im Zuge einer breit angelegten Sanierung erfolgt als bei Einfamilienhäusern. Die Kopplung von Sanierungsaktivitäten und dem Umbau von Heizanlagen ist damit bei Mehrfamilienhäusern sehr wichtig (Clausen & Hinterholzer, 2023).

In Zukunft könnte darüber hinaus auch die Luft-Luft Wärmepumpe in Mehrfamilienhäusern Bedeutung erlangen. Mit ihr lassen sich Wohnungen, die mit Etagenheizungen ausgerüstet sind, auch unabhängig von der Umrüstung auf ein zentrales Heizungssystem klimaneutral beheizen. Auch Luft-

Wasser Wärmepumpen für die Umrüstung von Etagenwohnungen sind aber in der Entwicklung. Diese können dann auch die Warmwasserversorgung übernehmen.

### 4.3 Wärmepumpen in Wärmenetzen

Wärmepumpen können nicht nur in Einzelgebäuden eingesetzt, sondern werden auch in Wärmenetzen zukünftig eine wichtige Rolle spielen. In Stockholm pumpen Großwärmepumpen die 30 °C warme Abwärme aus Rechenzentren auf Netztemperatur von 70 °C (Hintemann & Clausen, 2018), in anderen Städten wird Wärme aus Flüssen oder Kläranlagen in die Wärmenetze gepumpt. Auch die Industrie kann Quelle von Abwärme sein, die teilweise über Wärmepumpen erschlossen werden muss.

#### 4.3.1 Abwasser-Wärmepumpen

Alle Kommunen betreiben Kläranlagen. In ihnen wird Abwasser aus dem Ortsgebiet und manchmal auch aus umliegenden Gemeinden gereinigt. In vielen Klärwerken wird Klärgas (Methan) gewonnen und häufig in BHKW genutzt.

An Kläranlagen kann aber auch über das Methan hinaus Energie gewonnen werden. Denn das aus der Kläranlage abfließende Wasser hat auch im Winter eine Temperatur von 10 bis 15 °C (Energie Schweiz, 2017) die mit Wärmepumpen auf nutzbare Temperaturen für Fernwärmenetze gebracht werden können. Das Unternehmen Energie Wien installiert an der Kläranlage von Wien gegenwärtig Europas leistungsstärkste Großwärmepumpen, die in der ersten Ausbaustufe eine Wärmeleistung von 55 MW haben werden (Wien Energie, 2023). Sie kühlen das aus der Kläranlage abfließende Wasser um 6 Kelvin ab und liefern Fernwärme auf dem Temperaturniveau von 90 °C. Jede der zunächst drei und in der Endausbaustufe sechs Großwärmepumpen hat ein Gewicht von 205 Tonnen. Bei 4.000 Betriebsstunden jährlich und Einsatz in der Mittellast (z.B. Oktober bis März) liefern die ersten drei Anlagen ab Ende 2023 jährlich 220 GWh Wärme, alle sechs Anlagen werden ab 2027 dann ca. 440 GWh zum Fernwärmebedarf von Wien beitragen (Wien Energie, 2023).

**Abbildung 18: Wärmepumpen in der ebswien Kläranlage im Januar 2023**



Quelle: Wien Energie/Johannes Zinner

## WÄRMEPUMPEN IN DER WÄRMEPLANUNG

Auch in kleineren Gemeinden wird aber schon seit langer Zeit die Wärme aus dem geklärten Abwasser genutzt. Schon seit 1994 versorgt die Energie Freiamt AG in der Gemeinde Muri in der Schweiz mit ihren 7.000 Einwohnenden 200 Wohnungen mit 1,7 GWh/a Wärme aus Abwasser. Hierzu wird das kalte geklärte Abwasser über Leitungen von 3,2 km Länge zu sieben Heizzentralen geführt, in denen jeweils eine Wärmepumpe für die Erzeugung der Grundlastwärme und ein Ölheizkessel für die Spitzendeckung sorgt (Energie Schweiz, 2017).

Aber nicht nur hinter der Kläranlage, auch verteilt in den einzelnen Kanälen des Abwassernetzes, lässt sich Wärme auf dem Abwasser nutzen. So wird z.B. im Rathaus in Fürth seit 2011 Abwasserwärme zur Wärmegewinnung genutzt. Es wurden 70 Kanal-Wärmetauscher in acht Metern Tiefe in einem Abwasserkanal in der Nähe des Rathauses montiert. Eine Abwasser-Wärmepumpe entzieht dem Abwasser rund 215 kW Wärmeleistung zur Beheizung des 10.000 m<sup>2</sup> großen Rathauses.

**Abbildung 19: Rathaus von Fürth**



Quelle: Janericloebe, CC BY 3.0

Wärmenutzung lässt sich grundsätzlich ab ca. 400 mm Durchmesser des Kanals (DN 400) realisieren. Meist werden aufgrund der Vorteile von größeren Projekten aber Projekte ab DN 800 durchgeführt. Neben dem Durchmesser ist auch der sogenannte Trockenwetterabfluss (in l/s) wichtig. Nur wenn auch bei trockenem Wetter (also ohne Regen) ein Abfluss von mehr als ca. 10 l/s vorliegt ist eine kontinuierliche Wärmenutzung darstellbar (Drachenfels, 2023b). Praktische Erfahrungen lassen bei 10 l/s gut 100 kW thermische Energie dem Abwasser erwarten. Die Wärmeentnahme aus Kanalabschnitten ist eine gute Wärmequelle für große Gebäude oder einzelne Quartiere, die z.B. heute mit Blockheizkraftwerken beheizt werden.

## WÄRMEPUMPEN IN DER WÄRMEPLANUNG

In jeder Stadt ist grundsätzlich dieses Wärmepotenzial vorhanden und in den meisten Fällen auch zu erschließen. Die Unternehmensberatung KPMG hat die Potenziale von Wärme aus Abwasser in London untersucht und ungefähr 10 TWh/a gefunden. Bezogen auf ca. 15 Mio. Menschen, deren Abwasser dort gesammelt und gereinigt wird, sind das fast 600 kWh/a Wärme pro Person (KPMG, 2023).

Aus Abwasserkanälen und Kläranlagen lassen sich ca. 600 kWh Wärme pro Person gewinnen.

600 kWh/a Wärme bezogen auf die Einwohnenden ist eine große Menge. In einer Stadt wie Hannover mit ihren ca. 500.000 Einwohnenden wären das enorme 300 GWh/a, die einen erheblichen Beitrag zur Wärmeversorgung leisten können. In Hannover befinden sich am Klärwerk Herrenhausen gegenwärtig zwei Wärmepumpen mit je ca. 15 MW<sub>th</sub> Heizleistung in Planung. Ihr Einsatz ist in den Wintermonaten mit ca. 4.000 Betriebsstunden geplant. Es wird eine Wärmemenge von ca. 130 GWh/a erzeugt und der COP im Auslegungspunkt wird bei 2,8 liegen (Briddigkeit, 2023).

Auch Gegenargumente werden aber aufgeführt. So bestehen häufig Bedenken, dass die Entnahme von Wärme aus dem Kanalnetz aufgrund des Absinkens der Temperatur die Funktion der Kläranlage beeinträchtigen könnte oder es wird es wird darauf hingewiesen, dass in Städten in der Ebene der Einbau von Wärmetauschern den Abfluss des Abwassers aufhalten und so langfristig zu einem verstopfen der Kanäle führen könnte.

Die Frage des Absinkens der Temperatur behandelt auch der Leitfaden von Energie Schweiz (2017):

### Allgemeingültige Grenzkriterien für die Wärmenutzung aus ungereinigtem Abwasser in der Kanalisation vor der Kläranlage:

Falls die durch eine Wärmeentnahme aus einem Kanalisations-Teilstrang resultierende Temperatur im Kläranlagen-Zulauf im Durchschnitt der Wintermonate Dezember, Januar und Februar 10 °C nicht unterschreitet und die resultierende Abkühlung im Kläranlagen-Zulauf 0,5 K ist (entspricht dem langjährigen periodenbezogenen Schwankungsbereich), ist die Wärmeentnahme ohne detaillierte Untersuchungen zulässig.

Falls die durch eine Wärmeentnahme aus einem Kanalisations-Teilstrang resultierende Temperatur im Kläranlagen-Zulauf im Durchschnitt der Wintermonate Dezember, Januar und Februar 10 °C unterschreitet und/oder die resultierende Abkühlung im Kläranlagen-Zulauf > 0,5 K ist, muss eine detaillierte Überprüfung des Einflusses auf den Kläranlagen-Betrieb unter Berücksichtigung der Dimensionierungstemperatur erfolgen (Beschreibung des Vorgehens in Kapitel 8 des Leitfadens von Energie Schweiz (2017)). Anhand der Überprüfung kann entschieden werden, ob die Kläranlagen-Reinigungsleistung durch die geplante Wärmeentnahme nicht beeinträchtigt wird und entsprechend die Wärmeentnahme zulässig ist.

(Energie Schweiz, 2017)

Da die Temperaturabsenkung durch Wärmeentnahme aber häufig in der gleichen Größenordnung liegt, wie die natürlichen Wärmeverluste in der Kanalisation, ist im Normalfall nicht damit zu rechnen, dass die Temperaturabnahme Auswirkungen auf die Kanalisation selbst hat (Energie Schweiz,

2017). Klar ist, dass innerhalb eines Kanals nicht zu viel Wärme entnommen werden sollte. Als Faustzahl wird damit gearbeitet, dass auf einen z.B. 100 m langen Wärmetauscher eine mindestens 200 bis 300 m lange Strecke ohne Wärmeentnahme folgen sollte (Drachenfels, 2023a). Denn es ist so, dass sich die Temperatur des Abwassers erholt – durch neue warme Zuflüsse sowie durch die Erdwärme, die das Kanalrohr umgibt. Genau vorhersagen lässt sich das aber alles noch nicht, denn übertragbare Forschungsergebnisse liegen noch nicht vor. Ein Kanal kann in sehr unterschiedlichen Tiefen liegen bzw. auch in unterschiedlichen Umgebungen („warme“ Großstädte vs. „kühlere“ nicht so dicht besiedelte Kommunen) und damit kann auch das umgebende Erdreich unterschiedliche Temperaturen aufweisen (Drachenfels, 2023a). Die Strecke, in der sich die Temperatur regeneriert, kann also unterschiedlich lang sein.

Auch die Behinderung des Abflusses durch den Einbau von Wärmetauschern ist denkbar, aber meist kein Grund, die Wärmenutzung zu unterbinden. Objektiv ist das Risiko minimal, wenn schlicht gar nichts in den Kanal eingebaut wird, aber dann ist auch der Beitrag zur Wärmeversorgung meist Null. Wenn mit Sachverstand ein Einbauabschnitt festgelegt wird und wenn man beachtet, wie die Hydraulik in dem Kanalabschnitt aussieht, lassen sich schädliche Einflüsse auf den Abfluss begrenzen. Zudem sind moderne Kanal-Wärmetauscher am Beginn und dem Ende der Wärmetauscherstrecke angeschrägt und das Abwasser fließt so ohne nennenswerten Widerstand auf die Strecke und wieder herunter. Viele Anlagen sind mit Edelstahl-Blechen verkleidet – dadurch bieten sich an den Anlagen dann kaum Angriffsflächen für das Hängenbleiben von festen Gegenständen. Und integriert man den Wärmetauscher in das Kanalrohr, wie in Abbildung 20 gezeigt, entfällt das Argument mit einem erhöhten Fließwiderstand vollends.

**Abbildung 20: In Abwasserrohr integrierter Wärmetauscher für den Kanalneubau**



Quelle: Rabtherm AG

Auf Basis eines guten kommunalen Wärmeplans könnte also im Rahmen der turnusmäßigen Sanierung von Kanalrohren die Grundlage für einen Beitrag zur zukünftigen Wärmenutzung geschaffen werden.

### **4.3.2 Flusswasser-Wärmepumpen**

In an Flüssen gelegenen Orten, die mit Fernwärme versorgt werden können oder bereits versorgt sind, kann durch Flusswasser-Wärmepumpen „verbrennungsfreie“ Wärme anteilig für das Fernwärmenetz bereitgestellt werden. Flüsse spielen in der Wärmewirtschaft schon lange eine Rolle, denn sie dienen in vielen Fällen der Abführung überschüssiger Wärme aus fossilen Kraftwerken. Mit der Einleitung von Wärme, so problematisch diese gerade im Sommer auch ist, hat die Energiewirtschaft

insoweit schon lange Erfahrung. Dies gilt auch in Bezug auf den Bau großer Wärmetauscher, die fischfreundliche Konstruktion der wasserbaulichen Anlagen wie auch für die Durchführung der wasserrechtlichen Genehmigungsverfahren. Insoweit sollte eine gute Chance bestehen, auch die Entnahme von Wärme aus Flüssen sowohl technisch wie auch juristisch in den Griff zu bekommen. In manchen Fällen können zudem die früher zum Zwecke der Kühlung von Kraftwerken angelegten Entnahme- und Einleitungsbauwerke für die Nutzung von Flusswasserwärme durch Wärmepumpen wieder aktiviert und nun mit geänderter Nutzung weiter betrieben werden (Briddigkeit, 2023). Auch die wasserrechtliche Genehmigung mag mit Blick auf die Beschränkung auf eine Nutzungsänderung einfacher sein.

Ausgangspunkt dabei sind unsere Flüsse, die aufgrund des Klimawandels im Mittel wärmer sind, als sie dies noch vor einigen Jahrzehnten waren. Die europäische Umweltagentur dokumentiert z.B. für den Niederrhein an der niederländischen Grenze in den letzten hundert Jahren einen Anstieg der Wassertemperaturen um ca. 2 Kelvin (European Environmental Agency, 2021) und stellt vergleichbare Effekte an allen wesentlichen Flüssen in Europa fest.

Schwinghammer (2012) führt zur thermischen Nutzung von Fließgewässern aus, dass einerseits eine Minimaltemperatur des entnommenen Flusswassers zur Benutzung mittels einer Wärmepumpe von 2 °C zu berücksichtigen ist, da bei noch tieferen Temperaturen die Wärmetauscher vereisen und eine Nutzung nicht möglich ist. Oberhalb dieser Minimaltemperatur nimmt er als maximale Temperaturspreizung im Wärmepumpen-Kreislauf den Wert von 5 K an. Hat ein Fluss also z.B. Ende Oktober eine Temperatur von 12 °C kann eine Wärmepumpenanlage das entnommene Flusswasser theoretisch um bis zu 5 K auf 7 °C abkühlen. Zumindest die Abkühlung des Wassers um die in den letzten hundert Jahren erfolgte Temperaturerhöhung von 2 K sollte fast überall unproblematisch sein.

In kleinem Maßstab erfolgt die Nutzung von Flusswasserwärme seit mindestens 1938. In diesem Jahr wurde im Rathaus von Zürich eine Flusswasser-Wärmepumpe mit einer Leistung von 66 kW eingebaut, die das Rathaus bis in das Jahr 2001 anteilig mit Wärme versorgte und auch heute noch als Back-up Anlage funktionsfähig ist (Schwinghammer, 2012).

Inzwischen gibt es auch in Deutschland einige Kommunen, die Großwärmepumpen an Flüssen im Einsatz haben. Die Stadt Rosenheim betreibt zum Beispiel eine Großwärmepumpe mit einer Leistung von 1,5 MW<sub>therm</sub>. Sie entzieht dem Rosenheimer Mühlbach thermische Energie (Stadtwerke Rosenheim, 2022):

*„Beim Durchlauf des Bachwassers durch die Wärmepumpe wird das Wasser abgekühlt und so die thermische Energie entnommen, bevor es wieder in den Mühlbach zurückgeleitet wird. Die gewonnene Energie wird über das Müllheizkraftwerk dem Fernwärmenetz zugeführt und trägt damit zu einer klimaneutralen Energiegewinnung bei. Der Standort für die Wärmepumpen an der Schönfeldstraße ist zudem strategisch gut gewählt. Die Nähe zum Heizkraftwerk der Stadtwerke Rosenheim und der angrenzende Bachlauf des Mühlbachs machen diesen Standort effizient und wirtschaftlich.“*

Die Großwärmepumpe wird so in die Fernwärmeerzeugung des Müllheizkraftwerkes in Rosenheim integriert und nutzt dabei die Temperatur des benachbarten Mühlbaches. Installiert wurde ein Gerät der Firma Johnson Controls: eine zweistufige Wärmepumpe mit Schrauben- und Hubkolbenverdichter. Die Wasser-Wasser-Wärmepumpe schafft abhängig von der Temperatur des Flusswassers Jahresarbeitszahlen von 2,5 bis 2,8 (Stadtwerke Rosenheim, 2022):

**Abbildung 21: Einbau der Flusswasser-Wärmepumpe bei den Stadtwerken Rosenheim**



Foto: Stadtwerke Rosenheim / BWP

Auch bei den Stadtwerken Mannheim entsteht gerade eine große Flusswasser-Wärmepumpe. Mit einer Wärmeleistung von 20 MW<sub>therm</sub> und einer Antriebsleistung von 7 MW<sub>el</sub> gehört sie aktuell zu den großen Wärmepumpen. Das Flusswasser-Wärme-potenzial wird durch sie aber nicht annähernd ausge-schöpft. In Mannheim könnten Rhein und Neckar bei vorsichtiger Schätzung mindestens 500 Megawatt ther-misch entzogen werden (Stadtwerke Mannheim, 2022).

Eine deutlich kleinere Anlage arbeitet seit 2022 in Lemgo in Westfalen. Auf dem Schwimmbadgelände ist eine Wärmepumpe mit einer Leistung von 1 MW instal-liert, die als Wärmequelle den nahen Fluss Bega nutzt. Dessen Wasser ist ca. 6.000 Stunden im Jahr warm genug um Fernwärme daraus zu gewinnen (Stadtwerke Lemgo, 2023).

Eine bundesweite Potenzialstudie der Wärmepotenziale der Flüsse in Deutschland wird im Auftrag des Niedersächsischen Energieforschungszentrums EFZN gegenwärtig an der Technischen Universität Braunschweig erarbeitet (Seidel, 2023). Eine erste Abschätzung lässt ein theoretisch riesiges nutzba-res Potenzial an Flusswasserwärme in der Größenordnung von 500 TWh erahnen (Seidel, 2023). Die detaillierten Ergebnisse werden voraussichtlich Ende 2023 veröffentlicht.

Wenn ein Fluss durch die Ge-meinde fließt, kann dieser als Quelle für die Nutzung von Umweltwärme eingeplant wer-den.

### **4.3.3 Nutzung von Abwärme über Wärmepumpen**

Abwärme fällt in einer Reihe von Industriebetrieben an und wird gegenwärtig meist in die Luft oder in Gewässer abgegeben. Für Niedersachsen errechnet die Hochschule Osnabrück ein jährliches theo-retisches Abwärmepotenzial von ca. 13 TWh (Kompetenzzentrum Energie, 2017). Die bedeutendsten Abwärmeequellen finden sich dabei in Betrieben der Metallerzeugung und -bearbeitung mit ca. 6,4 TWh/a, bei der Herstellung von Glas, Keramik sowie der Verarbeitung von Steinen und Erden mit ca. 2 TWh/a und bei der Herstellung und Verarbeitung von Papier und Pappe, der Mineralölverarbeitung sowie der chemischen Industrie mit jeweils ca. 1,3 TWh (Kompetenzzentrum Energie, 2017).

## WÄRMEPUMPEN IN DER WÄRMEPLANUNG

Abhängig vom jeweiligen Industrieprozess kann die Abwärme dabei bei sehr unterschiedlichen Temperaturen anfallen. Auch Temperaturen ab 30 °C wie sie z.B. für die Abwärme in Rechenzentren typisch sind, sind dabei für die Fernwärmeerzeugung über Wärmepumpen nutzbar.

Wie viel dieser Abwärme in der Praxis genutzt werden kann, hängt von den verwendeten Technologien und den vorhandenen Möglichkeiten zur Abnahme der Abwärme ab (Funke et al., 2019). Wie Beispiele aus Schweden zeigen, ist eine systematische Nutzung der Abwärme von z.B. Rechenzentren in Fernwärmenetzen heute schon technisch sehr gut umsetzbar (Clausen, Hintemann, & Hinterholzer, 2022). Die Abwärme aus über 30 Rechenzentren in Stockholm wird mit Wärmepumpen von einer Temperatur von ca. 30 °C auf ca. 70 °C gepumpt und so im Sommer in den Vorlauf des dann nicht ganz so heißen Wärmenetzes eingespeist. Im Winter fließt die Wärme in den Rücklauf zu einem Biomasseheizwerk, welches dann die im Winter höhere Vorlauftemperatur von über 100 °C einstellt.

Für den wirtschaftlichen Betrieb solcher Anlagen sind sowohl die Arbeitszahl der Wärmepumpenanlage als auch der jeweilige Preis für Strom und die alternativ zur Verfügung stehenden Wärmequellen von Bedeutung.

Die Arbeitszahl einer Wärmepumpenanlage hängt im Wesentlichen von der Temperatur der Wärmequelle und der Temperatur ab, die für das Netz bereitgestellt werden soll. Je größer die Temperaturdifferenz, desto niedriger die Arbeitszahl. Bei großen Wärmemengen sollte erwogen werden, eine mehrstufige Wärmepumpenanlage zu bauen, die die Wärme in mehreren Schritten auf das höhere Temperaturniveau pumpt und insgesamt eine bessere Arbeitszahl realisiert als ein Prozess, der nur in einem Schritt stattfindet.

**Abbildung 22: Großwärmepumpen im Stockholmer Wärmenetz**



Quelle: Revemann

Von hoher Bedeutung ist auch der Strompreis. Der in Deutschland hohe Strompreis spielt dabei bei der Nutzung der Wärmepumpe durch ein Stadtwerk nicht immer eine eindeutige Rolle, da die Pumpe z.B. auf dem Gelände eines Kraftwerks des Versorgers mit selbst erzeugtem Strom und ohne die Zahlung von Netzentgelten betrieben werden kann. Hier kommt es also immer auf den Einzelfall und auch auf strategische Entscheidungen des Betreibers des Wärmenetzes bzw. des Stromversorgers an.

Auch neue Abwärmequellen werden in der Zukunft entstehen. So ist im Zuge des Aufbaus der Wasserstoffwirtschaft geplant, große Zahlen an leistungsstarken Elektrolyseuren zu installieren. Diese sollten grundsätzlich immer in der Nähe von Wärmenetzen gebaut werden, denn etwa 20 % der benötigten elektrischen Energie fallen auf einem Temperaturniveau von 55 bis 60 °C als Abwärme an und können über Wärmepumpen in Wärmenetze eingespeist werden (Hanke-Rauschenbach & Peterssen, 2021). Standortentscheidungen z.B. in Bezug auf Elektrolyseure sollten daher grundsätzlich so gefällt werden, dass eine Abwärmennutzung unproblematisch möglich ist.

Abwärmequellen in bestimmten Branchen der Industrie, aber auch Rechenzentren und die kommenden Elektrolyseure der Wasserstoffwirtschaft sind wichtige Wärmequellen der Zukunft.

### 4.4 Einordnung der Zahlen

Niedersachsen hatte Ende 2022 ca. 8,14 Mio. Einwohnende, denen pro Kopf ca. 52,2 m<sup>2</sup> Wohnfläche zur Verfügung standen. Die Energieeffizienzstrategie für das Land Niedersachsen (Anonym, 2020) weist pro Quadratmeter einen Wärmeverbrauch von 140 kWh im Jahr aus. Die Beheizung der Gesamtfläche erfordert damit jährlich einen Wärmemenge von ca. 60 TWh, etwa 10 % des bundesweiten Verbrauchs (AG Energiebilanzen, 2021). Hinzu kommt der Wärmeverbrauch zur Beheizung von Gewerbeflächen im GHD-Sektor und der Industrie. In Anlehnung an bundesweite Zahlen (AG Energiebilanzen, 2021) kann dieser Verbrauch auf ca. 37 % des Verbrauchs der privaten Haushalte und damit auf 22 TWh/a veranschlagt werden. In Summe ergeben sich 82 TWh/a, was wiederum in etwa einem Zehntel des bundesweiten Verbrauchs entspricht.

Wenn nun die Hochschule Osnabrück ein jährliches theoretisches Abwärmepotenzial von ca. 13 TWh errechnet (Kompetenzzentrum Energie, 2017), sind dies ca. 16 % des Bedarfs an Niedertemperaturwärme für Raumwärme und Warmwasser und damit ein durchaus relevanter Anteil, der in der kommunalen Wärmeplanung sorgfältig zu erheben und zu berücksichtigen ist.

Das Wärmepotenzial aus Abwasser lässt sich pro Person auf ca. 600 kWh/a schätzen, was bei 8,1 Mio. Niedersachsen ca. 5 TWh/a ergibt.

Das Potenzial an Flusswasserwärme wird für alle Flüsse bundesweit gegenwärtig im Rahmen eines Projektes durch die TU Braunschweig abgeschätzt. Auf Basis eines ersten Ausblicks auf die Ergebnisse lässt sich, da Niedersachsen mindestens durchschnittlich mit Wasserläufen durchzogen ist, ein Flusswasser-Wärmepotenzial von ca. 40 bis 50 TWh/a schätzen.

Die drei Energieformen Flusswasserwärme, Abwasserwärme und Abwärme könnten damit perspektivisch mehr als die Hälfte des Wärmebedarfs in Niedersachsen decken. Zumindest für die Nutzung der Abwärme und der Flusswasserwärme wäre dafür aber ein Ausbau von Wärmenetzen erforderlich und auch die Nutzung von Abwasserwärme wird mit Wärmenetzen aussichtsreicher. In Niedersachsen befinden sich aber nur 1.700 km bzw. gut 5 % der bundesweiten Fernwärmetrassen (AGFW e.V., 2023). Zur Erschließung großer Potenziale regenerativer und verbrennungsfreier Wärme ist daher der Ausbau von Wärmenetzen in Niedersachsen besonders wichtig.

## 5 Wer darf wo eine Wärmepumpe aufstellen?

Mittelfristig werden Luft-Wasser Wärmepumpen auf zahlreichen Grundstücken aufgestellt werden. Begrenzt wird die Freiheit der Standplatzwahl dabei durch Bauvorschriften, die im deutschen föderalistischen System in der Zuständigkeit der Bundesländer liegen, sowie durch das Bundesimmissionsschutzrecht. Mit Blick auf die 16 verschiedenen Bundesländer stellt sich die Lage zwar immer noch verzwickter dar, wird aber langsam einfacher in Bezug auf die Platzierung von Wärmepumpen.

### 5.1 Aufstellung von Luftwärmepumpen

In einigen Bundesländern ist die Rechtslage eher unklar. In Niedersachsen wie auch in anderen Bundesländern bemisst sich der zulässige Abstand anhand der Schallemissionen nach dem Bundesimmissionsschutzgesetz und wird in einem 16-seitigen Leitfaden im Einzelfall geregelt (Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft für Immissionsschutz, 2020). Dieser Leitfaden soll zur Verbesserung der Vollzugspraxis bei der Einzelfallbeurteilung von stationären Geräten beitragen, wobei die Umweltministerkonferenz schon 2010 an den Bund die Bitte richtete, Lärmschutzvorschriften zu schaffen, mit denen den Lärmproblemen von stationären Geräten in Wohngebieten wirksam begegnet werden kann (Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft für Immissionsschutz, 2020).

Da im Rahmen der Aufstellung einer einfachen Luft-Wasser Wärmepumpe ein Prozess mit Schallmessungen, Berechnungen und Gutachten kaum zumutbar und mit Blick auf eine einfache Durchführung der Wärmewende keineswegs ein besonders praktikabler Weg ist, wird in der Praxis mit Faustzahlen gearbeitet. In den Bundesländern gelten allerdings sehr unterschiedliche Vorschriften, die insgesamt nicht systematisch wirken und offensichtlich dringend der Vereinheitlichung bedürfen.

**Tabelle 1: Anforderungen der Bundesländer an den Abstand einer Luftwärmepumpe zum Nachbargrundstück**

Bundesland	Abstand Wärmepumpe zum Nachbargrundstück
Baden-Württemberg	Kein Mindestabstand; Wärmepumpe muss Lautstärke-Grenzwerte der Technischen Anleitung (TA) Lärm einhalten: 35 - 45 dB nachts
Bayern	Unklar: Unterschiedliche Urteile, zuletzt 2018 durch das OLG München: WP ist kein gebäudeähnliches Bauwerk, keine Abstandsregelung, nicht final, Revision beim BGH ist anhängig
Berlin	Mindestens 3 Meter
Brandenburg	Unklar: Wird die Wärmepumpe als gebäudeähnlich eingestuft, ist der Abstand individuell zu errechnen, wird sie nicht als solche eingestuft und ist sie nicht mehr als 2 Meter hoch, gilt kein Mindestabstand
Bremen	Keiner
Hamburg	Mindestens 2,50 Meter, wenn die Wärmepumpe als gebäudeähnlich eingestuft wird
Hessen	Keiner, Wärmepumpe darf max. 2 Meter hoch und 3 Meter lang sein
Mecklenburg-Vorpommern	Mindestens 3 Meter, wenn die Wärmepumpe als gebäudeähnlich eingestuft wird, ansonsten kein Mindestabstand, Wärmepumpe darf nicht höher als 3 und nicht länger als 9 Meter sein
Niedersachsen	Rechtsgrundlagen unklar, 3 Meter werden empfohlen ( <i>mittlerweile geändert</i> )
Nordrhein-Westfalen	0,5 Meter
Rheinland-Pfalz	Keiner
Saarland	Keiner (Wärmepumpe nicht höher als 2 Meter, Lärmschutz muss eingehalten werden)

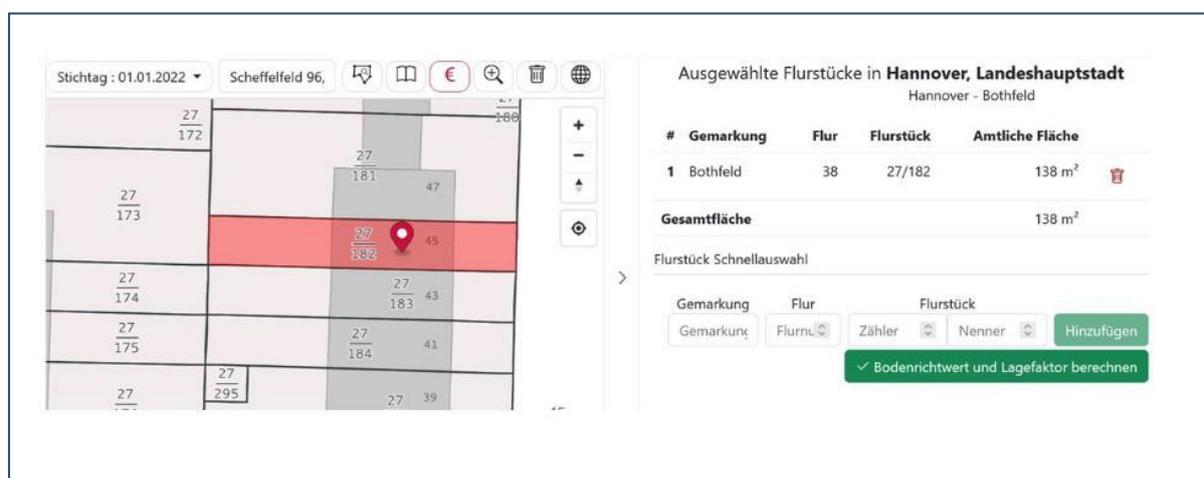
## WÄRMEPUMPEN IN DER WÄRMEPLANUNG

Sachsen	Rechtsgrundlagen unklar, 3 Meter werden empfohlen
Sachsen-Anhalt	Rechtsgrundlagen unklar, 3 Meter werden empfohlen
Schleswig-Holstein	Mindestens 3 Meter, wenn Wärmepumpe als Gebäude ähnlich eingestuft wird
Thüringen	Mindestens 3 Meter, wenn Wärmepumpe als Gebäude ähnlich eingestuft wird

Quelle: Nibe (2023), Stand: Januar 2023

Mit Blick auf die kommunale Wärmeplanung kommt allerdings der in mehreren Bundesländern übliche Mindestabstand von drei Metern in zahlreichen Wohngebieten einem Verbot von Luft-Wasser Wärmepumpen gleich. Als Beispiel dient hier ein Reihenhausgrundstück in Hannover, welches 138 m<sup>2</sup> groß ist und dessen Breite auf ca. 5,2 m geschätzt werden kann.

Abbildung 23: Beispielhaftes Reihenhausgrundstück in Hannover

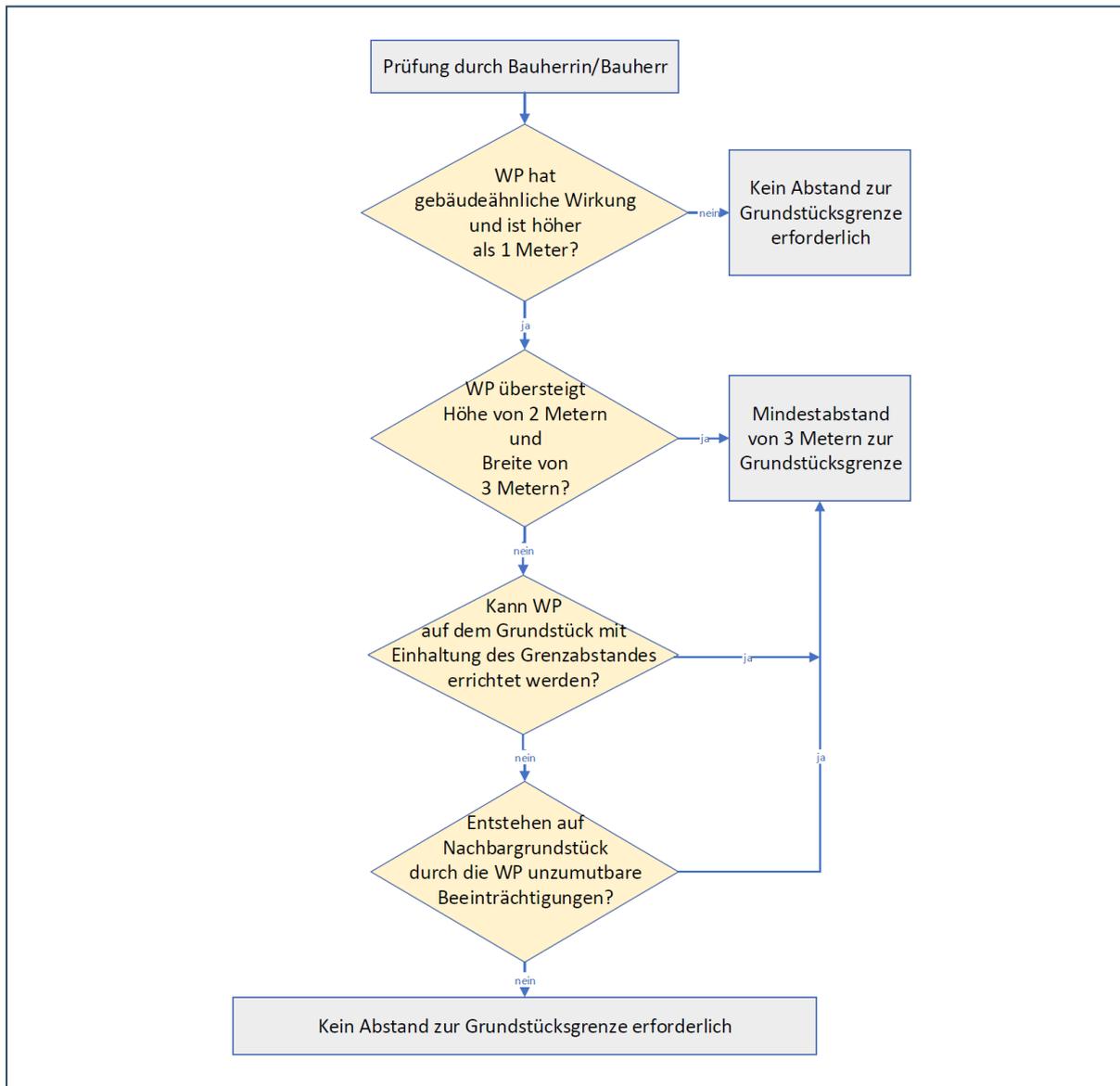


Quelle: Landesamt für Steuern Niedersachsen (2023)

Unter Einhaltung eines Abstandes von drei Metern zur Grundstücksgrenze ist die Aufstellung einer Luftwärmepumpe auf diesem Grundstück grundsätzlich nicht möglich. In die Frage des Mindestabstandes ist daher Bewegung gekommen. Die in NRW erst 2018 erlassene Vorschrift (BauO NRW) wurde am 16.12.2022 durch Runderlass aufgehoben (MHKBD, 2022). Der Erlass behebt das Problem eines Mindestabstandes von drei Metern zur Grundstücksgrenze. Der Mindestabstand entfällt jetzt. Zwar muss die Ausnahme von der Einhaltung des Mindestabstandes bei der Bauaufsichtsbehörde beantragt werden, einer Baugenehmigung für das Aufstellen der Wärmepumpe bedarf es aber nicht mehr.

Auch in Niedersachsen wurden eine Änderungen der Bauordnung beschlossen, die nun einen veränderten Rahmen für die Aufstellung von Wärmepumpen vorgibt. Die NbauO-Änderungen wurden im Gesetz- und Verordnungsblatt am 27.6.2023 veröffentlicht und sind seit dem 28.6.2023 in Kraft (Niedersächsische Staatskanzlei, 2023). Die Errichtung von Wärmepumpen ist nun verfahrensfrei und es ist keine Genehmigung erforderlich. Zur Veranschaulichung für das richtige Vorgehen hat das niedersächsische Bauministerium eine Grafik erstellt:

Abbildung 24: Grenzabstand von Wärmepumpen (WP)



Quelle: Niedersächsisches Ministerium für Wirtschaft, Verkehr, Bauen und Digitalisierung (2023)

Für die Aufstellung von Luftwärmepumpen in Niedersachsen gilt damit kein Mindestabstand mehr. Dennoch sind die Schallemissionen weiter von Bedeutung, die mit Blick auf über 200.000 in 2022 installierte Luft-Wasser Wärmepumpen aber in den meisten Nachbarschaften keine ernstzunehmenden Probleme zu verursachen scheinen.

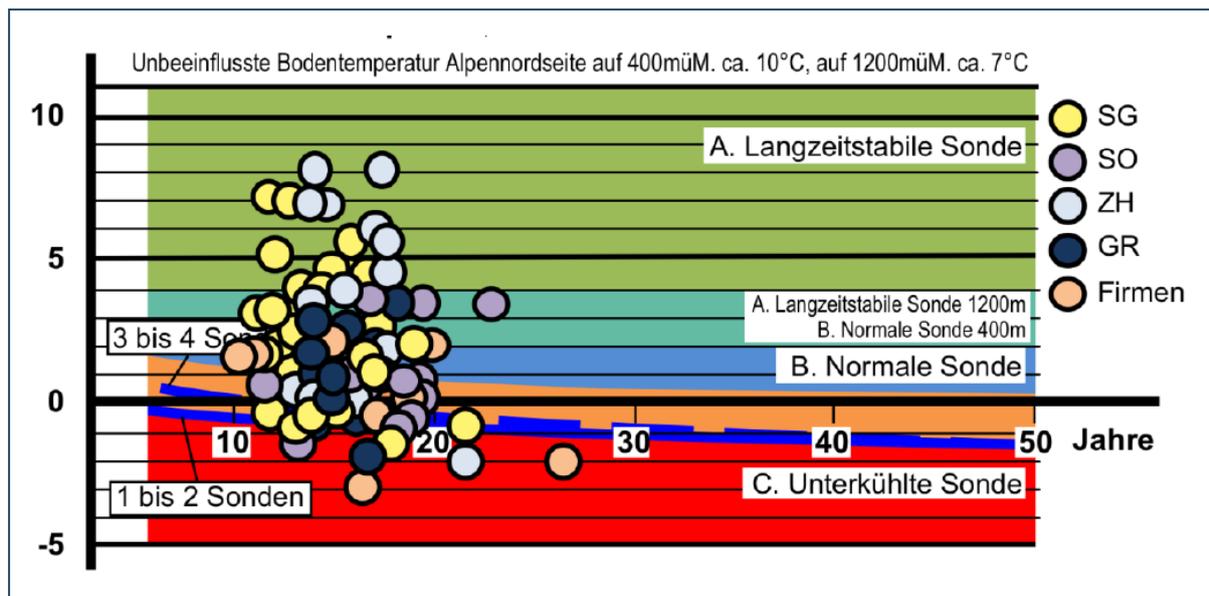
## 5.2 Platzierung von Erdwärmepumpen

Die dauerhafte Funktion von Erdwärmesonden ist sowohl bei Flächenkollektoren (Hüsing, Mercker, Hirsch, & Steinweg, 2017) wie auch bei Erdwärmebohrungen (Bertram et al., 2014; Kriesi, 2017; Witte, 2019) Gegenstand wissenschaftlicher Untersuchungen. Dabei steht im Mittelpunkt, dass bei zu hoher Wärmeentnahme oder zu kleinem Abstand zwischen den Kollektoranlagen eine dauerhafte Temperaturabsenkung im Boden um den Kollektor eintritt. Dadurch sinkt die erzielte

Jahresmitteltemperatur und damit die Leistungszahl der Wärmepumpe. Bedenken in Bezug auf eine zu hohe Wärmeentnahme spiegeln sich auch in deutlich abgesenkten Richtwerten für die Entzugsleistung in Watt pro Meter (W/m) im Zuge der Überarbeitung der VDI-Richtlinie 4640 zur „Thermischen Nutzung des Untergrunds“ im Jahr 2019 (Schäfer, 2019).

Sehr systematisch führte Kriesi in der Schweiz eine Untersuchung durch, in deren Rahmen Messungen an 91 Bohrungen stattfanden (Kriesi, 2017). Kriesi untersucht Sondenanlagen, die 10 bis 27 Betriebsjahre absolviert haben und ermittelt, dass etwa 24 % der Sonden zum Zeitpunkt der Untersuchung eine erfreulich hohe „minimale Jahresmitteltemperatur“ von über 4 °C liefern und damit als bis zu 50 Jahre langzeitstabil gewertet werden (Kriesi, 2017, S. 22). Weitere 44 % stuft er als „normal“ ein und erwartet auch hier eine auf 50 Betriebsjahre zu extrapolierende Langzeitstabilität. 32 % der Sonden stuft er allerdings als leicht unterkühlt und davon 11 % als deutlich unterkühlt ein. Kriesi stellt die untersuchten Sonden in einem Diagramm dar, welches auf der horizontalen Achse das Alter der Sonden und auf der vertikalen Achse die minimalen Jahresmitteltemperaturen der 91 gemessenen Anlagen darstellt (siehe Abbildung 25).

Abbildung 25: Minimale Jahresmitteltemperatur in Abhängigkeit vom Alter der Sonden



Quelle: Kriesi (2017, S. 22), Kantone: SG: St. Gallen, SO: Solothurn, ZH Zürich und GR Graubünden

Nach Einschätzung von Kriesi erscheinen als Einflussfaktoren auf die langfristig erzielte Jahresmitteltemperatur das Sondenalter, die Sondentiefe und auch die spezifische Belastung (also die Wärmeentnahme pro Meter Sondentiefe) erstaunlich unwichtig. So ermittelt Kriesi unter Ausschluss extremer Werte für den Einfluss der spezifischen Wärmeentnahme eine Differenz von etwa 2K zwischen 40 W/m und 70W/m Kondensatorleistung (Kriesi, 2017, S. 24). Die Wirkung des Sondenalters auf die mittleren Minimalwerte der Jahresmitteltemperaturen ermittelt Kriesi zu etwa 2.5K zwischen 10 und

Die dauerhafte Funktion einer Erdwärmesonde hängt stark von den Grundwasserströmungen sowie davon ab, wie viele weitere Erdwärmesonden in der Nähe verbaut sind.

27 Jahren. Eine Abhängigkeit der minimalen mittleren Sondentemperatur ist nicht zu erkennen (Kriesi, 2017, S. 25).

Vielmehr scheint die Anzahl nahe gelegener Sonden einen starken Einfluss auf die Mitteltemperatur zu haben. So ermittelt Kriesi, dass Erdwärmesonden mit drei bis sechs weiteren Sonden im Umkreis von etwa 30 Metern etwa 5K kühler im Vergleich gegenüber Einzelsonden sind (Kriesi, 2017, S. 25).

Kriesi erklärt die Tatsache, dass fast 20 % der gemessenen Sonden als „langzeitstabil“ erscheinen als eine Folge von Wasserbewegungen im Untergrund, die den Sonden Wärme großräumig zuführen. Je nach Geschwindigkeit des Grundwasserstroms und der Stärke der wasserführenden Schicht führt das bei diesen Sonden dazu, dass ihre erfreulich stabile Jahresmitteltemperatur weitgehend unabhängig von der spezifischen Wärmeentnahme, der Sondentiefe, dem Sondenalter oder sogar der Anzahl und Distanz der Nachbarsonden ist (Kriesi, 2017, S. 32).

Bei den Sonden, die nicht durch Grundwasserströme „warmgehalten“ werden und daher drohen, langfristig zu „unterkühlen“, empfiehlt Kriesi Maßnahmen der Regeneration der Sonden (Kriesi, 2017, S. 31). Eine solche Regeneration kann erfolgen durch (Kriesi, 2017, S. 31):

- ▶ **Raumkühlung durch Flächenheizungen**, durch die bei abgeschalteter Wärmepumpe das Kühlmittel durch Sonden und Boden zirkuliert und so dem Raum Energie entzieht und diese dem Erdreich zuführt. Nebeneffekt ist eine sommerliche Klimatisierung, die mit fortschreitendem Klimawandel den Wohnkomfort deutlich steigert.
- ▶ **Sonnenkollektoranlagen**, deren im Sommer reichlicher Ertrag anteilig in die Sonde eingespeist wird. Sowohl verglaste Flachkollektoren wie auch alle Arten sonstiger Kollektoren, wie sie z.B. für die Schwimmbadheizung Verwendung finden, können eingesetzt werden.
- ▶ Ein **Außenluftkühler**, der im Sommer mit einer Wärmepumpe invers betrieben wird und dessen Wärmeertrag in die Sonde eingespeist wird. Hier muss die Wärmepumpe mit etwa 50 % der Heizleistung betrieben werden, wie diese im Winter zum Heizen erforderlich ist.

Die Regeneration der Erdwärmesonden durch sommerliche Wärme gewonnen aus der Gebäudekühlung könnte sich zum zentralen Argument für die Kopplung von PV und Wärmepumpe entwickeln.

Das LBEG Niedersachsen empfiehlt: „Für Wärmepumpen mit einer Wärmeleistung bis 30 kW sollte der Mindestabstand von Erdwärmesonden mindestens 5 m untereinander bzw. 10 m zur nächstgelegenen Anlage auf einem benachbarten Grundstück betragen.“ und auch „Die Endpunkte der jeweiligen Schrägsonden sollten den Mindestabstand von 5 m zur Grundstücksgrenze nicht unterschreiten.“ (LBEG, 2012).

Diese implizite Forderung nach einem Mindestabstand zur Grundstücksgrenze findet sich auch an anderer Stelle und ist für die weitere Diffusion der Erdwärmepumpe auf kleinen Grundstücken wenig konstruktiv. Auf den in Abbildung 23 gezeigten Grundstücken wäre nirgends eine Erdwärmepumpe zulässig, obwohl ein Abstand von 10 Metern zur Bohrung auf dem Nachbargrundstück problemlos eingehalten werden könnte, wenn die Bohrung in jeweils einem Haus im Vorgarten und im Nachbarhaus im Hintergarten niedergebracht würde. Die Förderung nach einem Mindestabstand von 5 m ist damit zwar nachvollziehbar, keineswegs aber zweckmäßig, um eine Verbreitung der Erdwärmepumpen zu fördern.

## WÄRMEPUMPEN IN DER WÄRMEPLANUNG

Zudem wurde von der LBEG mitgeteilt, dass eine Bohrung auch in geringerem Abstand zur Grundstücksgrenze niedergebracht werden könne, wenn der Grundstückseigentümer des Nachbargrundstücks zustimme. In den Vorgärten ist dieser Eigentümer regelmäßig die Kommune als Eigentümer der Straße.

Ob die Nutzung einer Erdwärmesonde oder eines Erdkollektors grundsätzlich möglich ist, lässt sich mit Hilfe eines Onlinetools ermitteln, welches die Bundesländer Niedersachsen, Schleswig-Holstein, Hamburg und Bremen abdeckt (LBEG, 2023). Bei Eingabe einer Adresse sowie der benötigten Wärmemenge, unglücklicherweise in Kubikmeter Erdgas oder Liter Heizöl und nicht in Kilowattstunden, wirft das System die Information aus, ob dem Bau einer Erdsonde bis zu 200 m Tiefe bekannte Informationen entgegenstehen und wie tief die Erdsonde etwa sein müsste, um die benötigte Energiemenge generieren zu können.

Die kommunale Wärmeplanung sollte festschreiben, dass die Kommune das Niederbringen von Erdwärmesonden in Vorgärten generell auch dann gestattet, wenn die Bohrung einen Mindestabstand zur Grundstücksgrenze von nur 0,5 m einhält. Ausnahmen sind in der Kartendarstellung des Wärmeplans kenntlich zu machen.

Abbildung 26: Geothermie, geht das bei mir? Eingabemaske und Ausgabe für Erdsonde

The image shows two side-by-side screenshots of the LBEG website's geothermal assessment tool. The left screenshot is the input screen, titled 'Geothermie - geht das bei mir?'. It features a search bar with the address 'Giesackweg 11, 30659 Hannover, Bohnfeld'. Below the search bar is a map showing the location with a red pin. The right screenshot is the output screen, also titled 'Geothermie - geht das bei mir?'. It shows the results for a 'Sonde' (well) type. The output includes a summary: 'Der Bau einer Erdwärmesondenanlage ist an diesem Standort unter Beachtung folgender Bedingungen möglich.' It also lists 'Allgemeines' information, stating that no restrictions are known for the location and providing an estimated well depth of 105 to 175 meters. At the bottom of the output screen, there are buttons for 'neue Punkt setzen' and 'Ergebnis drucken'.

Quelle: LBEG (2023)

## 6 Die Herausforderungen der Sektorkopplung

### 6.1 Was bedeuten Wärmepumpen für das Stromnetz?

50 % der deutschen Haushalte heizen mit Erdgas, 25 % mit Heizöl (AG Energiebilanzen, 2021). Für das Heizen in deutschen Haushalten wurden 2020 ca. 285 TWh Erdgas eingesetzt (BDEW, 2020). Hinzu kommen ca. 131 TWh Heizöl (Statista, 2023). Das Szenario des Ariadne-Projektes (2021) geht davon aus, dass bis 2035 von diesen 75 % aller Heizanlagen etwas mehr als die Hälfte, ca. 38 %, durch Wärmepumpen ersetzt werden. Auch die Zahl der an Fernwärmenetze angeschlossenen Wohnungen würde deutlich zunehmen und es gäbe etwas mehr Biomasseheizungen. 25 % der Wohnungen würden auch dann noch mit Gas und Öl beheizt. Würden diese Heizungsanlagen mit modernen Luft-Wasser-Wärmepumpen mit einer durchschnittlichen JAZ von 3,2 (Miara, 2022) ersetzt, dann würde bis 2035 ein zusätzlicher Strombedarf von ca. 66 TWh für das Heizen von 38 % des Wohnungsbestandes durch Wärmepumpen anfallen. Ein weiterer, aber noch kaum quantifizierbarer Strombedarf entsteht darüber hinaus durch Großwärmepumpen, die zur Versorgung von Wärmenetzen installiert werden.

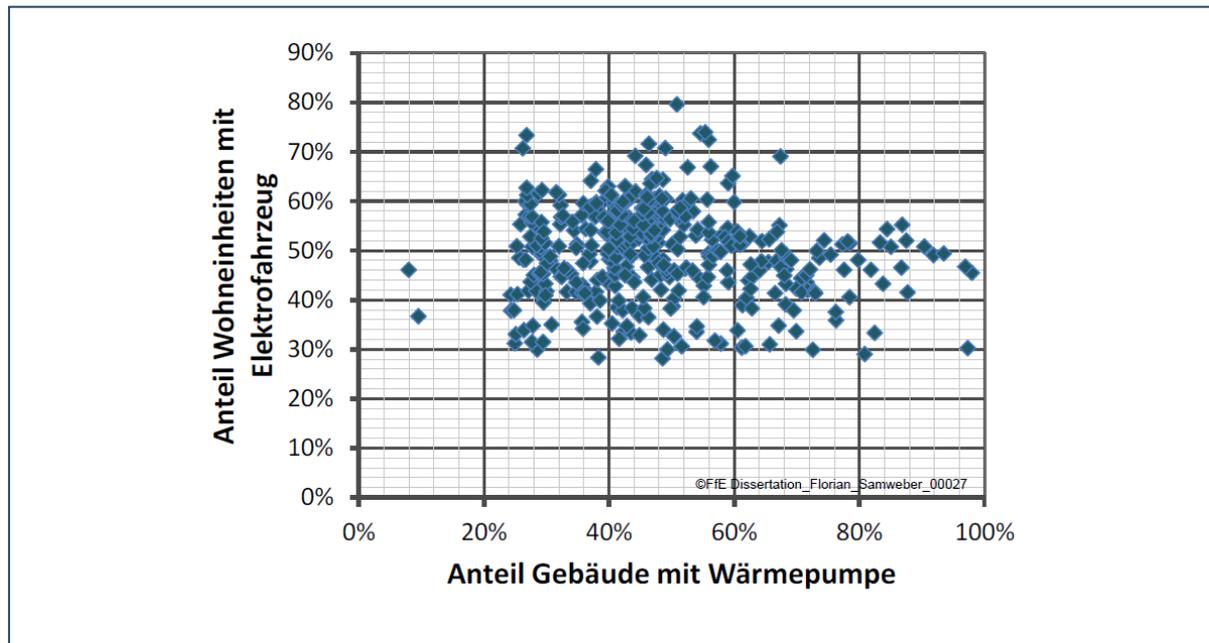
Bezieht man die Zahlen auf einzelne Wohnungen, wäre für die Wohnungen, die auf Wärmepumpe umstellen, von einem durchschnittlichen zusätzlichen Strombedarf von ca. 4.300 kWh/a auszugehen. Nun liegt der durchschnittliche Stromverbrauch der deutschen Haushalte bei ca. 3.200 kWh/a (Destatis, 2022). Wird also in einzelnen Stadtvierteln oder Dörfern eine annähernd flächendeckende Ausstattung der Haushalte mit Wärmepumpen, quasi als worst case, angenommen, so würde sich also der Stromverbrauch der privaten Haushalte in der Stromverteilnetzen in etwa verdoppeln. Hinzu käme ein zeitparalleler weiterer Anstieg durch Elektromobilität.

### 6.2 Ertüchtigung der Stromnetze

Schlömer (2017) sieht daher eine große Herausforderung für die Ertüchtigung der Verteilnetze. Durch die Veränderungen der Versorgungsaufgabe durch Wärmepumpen und Elektromobilität als zusätzliche Abnehmer wie auch durch die dezentrale Photovoltaik als neue Stromerzeuger seien kostenintensive Netzverstärkungs- und Ausbaumaßnahmen erforderlich (Schlömer, 2017).

Mit Hilfe von Jahressimulationen für verschiedene Verteilungen der Lasten und Erzeuger in typischen Niederspannungsnetzen hat Samweber (2017) einen systematischen Vergleich verschiedener technischer, ökologischer und ökonomischer Bewertungsdimensionen einer starken Elektrifizierung der Wärmeversorgung und der Mobilität untersucht. Dabei legt er einen hohen Verbreitungsgrad sowohl von Wärmepumpen wie auch Elektrofahrzeugen zugrunde, findet aber dennoch starke Unterschiede zwischen den einzelnen Regionen.

Abbildung 27: Anteile an Elektrofahrzeugen je Wohneinheit und Wärmepumpen je Gebäude – Jeder dargestellte Datenpunkt entspricht einer Region in Deutschland



Quelle: Samweber (2017, S. 57)

Die Simulation zeigt in vielen Regionen Spannungsbandverletzungen und lässt insoweit auf die Notwendigkeit der Erhöhung des Stromnetzes schließen. Da innerhalb der Regionen mit großen Ungleichverteilungen zu rechnen ist, sind Einzelfalluntersuchungen erforderlich, um die Notwendigkeit von Maßnahmen der Netzertüchtigung zu ermitteln. Auch Bürger, Braungardt, & Miara (2022) erwähnen die Notwendigkeit, das Stromverteilnetz für eine steigende Zahl von Wärmepumpen zu ertüchtigen, gehen aber nicht in die Details.

In Gebieten, in denen mangels anderer Wärmequelle mit einem hohen Ausstattungsgrad mit Wärmepumpen zu rechnen ist, sollte als Ergebnis der kommunalen Wärmeplanung der Stromnetzbetreiber zur Untersuchung, Planung und Durchführung von Maßnahmen der Netzertüchtigung angehalten werden.

### 6.3 Flexibilisierung der Stromnetze

Wärmepumpen bieten ein Potenzial für die Lastverschiebung, welches aber nur in Abhängigkeit von der Verbreitung anderer Innovationen erschlossen werden kann (Bürger et al., 2022):

*„Wärmepumpen können aufgrund ihres Lastverschiebungspotenzials die Flexibilisierung der Stromnetze unterstützen. Schon jetzt sind fast alle auf dem Markt erhältlichen Wärmepumpen Smart Grid ready. Das bedeutet, dass eine Wärmepumpe über eine definierte Schnittstelle verfügt, über die sie durch entsprechende Signale aus dem Verteilnetz angesteuert werden kann, um ihren Betrieb möglichst systemdienlich zu optimieren. Allerdings können die Potenziale*

*ohne die notwendige Infrastruktur (zum Beispiel intelligente Zähler) und entsprechende Geschäftsmodelle (zum Beispiel variable Stromtarife) nicht vollumfänglich ausgeschöpft werden.“*

Im Zuge des Ausrollens von Wärmepumpen in ganze Stadtviertel ist es also erforderlich, auch die Voraussetzungen für deren netzdienliche Steuerung zu schaffen, also sowohl Smart Meter einzubauen als auch Wärmepumpentarife anzubieten, die dem Netzbetreiber Steuerungsmöglichkeiten schaffen und dabei den „gefühlten Service“ auf Seite des Kunden nur unwesentlich beeinträchtigen.

### 6.4 Die Einbindung neuer Kraftwerke in die Wärmewirtschaft

Gegenwärtig werden in Niedersachsen nur ca. 7 TWh/a durch Wärmenetze verteilt (NMU, 2022), davon ca. 25 % durch das Wärmenetz der Landeshauptstadt Hannover (Voigts, 2023). Auf Basis der Schätzung des gesamten Verbrauchs an Raumwärme und Warmwasser in Niedersachsen von ca. 82 TWh (vgl. Abschnitt 4.4) und unter Annahme eines mit Blick auf Abschnitt 3.2 nicht unwahrscheinlichen Versorgungsgrades von 25 % durch Wärmenetze könnte es sinnvoll sein, die Versorgung durch Wärmenetze auf eine Wärmemenge von ca. 20 TWh/ auszubauen. Allein die aus Flusswasser, Abwasser und Abwärme gewinnbaren Wärmemengen (vgl. Kapitel 4.3) sollten ausreichen, um den größten Teil dieser Wärmemenge bereitzustellen. Die aufgeführten Wärmequellen sind aber ausnahmslos eher für Grundlast und Mittellast geeignet. Spitzenlast können sie nicht bereitstellen.

Für das zukünftig ausgebaute Wärmenetz in Kassel, welches ca. 2 TWh/a bereitstellen soll, wurden vom Fraunhofer IEE Arbeits- und Leistungsdaten in Beziehung gesetzt (Best et al., 2021). Es wurde errechnet, dass Wärmequellen mit ca. 750 MW Leistung zur Verfügung stehen müssen, davon ca. 100 MW Grundlast, 400 MW Mittellast und 250 MW Spitzenlast. Diese Spitzenlast wird typischerweise durch Gaskraftwerke bereitgestellt, in Hannover z. B. durch das Erdgaskraftwerk Linden, für welches der Umbau in ein Wasserstoffkraftwerk geplant ist (Voigts, 2023).

Unter der Annahme, dass die Wärmeplanung für die großen Städte in Niedersachsen innerhalb der nächsten drei Jahre bis Mitte 2026 durchgeführt wird, müsste sich also bis dahin klären, welche großen Wärmenetze realisiert werden sollen und welche Spitzenlast dafür erforderlich wäre. Unter der weiteren Annahme, dass dies auf die in den Szenarien geschätzten 25 % der gesamten Wärmemenge hinausläuft, wäre eine Wärmemenge von ca. 20 TWh durch Wärmenetze bereitzustellen. Dies würde wiederum erforderlich machen, ca. 2,5 GW Wasserstoff-Spitzenlastkraftwerke für die winterlichen Lastspitzen neu zu bauen oder bestehende KWK-Anlagen auf Wasserstoff umzurüsten. Um die Energie der Brennstoffe optimal zu nutzen, sollten diese Kraftwerke in KWK ausgeführt werden und so gleichzeitig das Wärmenetz wie das Stromnetz unterstützen. Denn auch das Stromnetz wird zukünftig bei kalten Temperaturen durch hohe Nachfrage der Wärmepumpen belastet sein.

Nun ist es so, dass auch im Stromnetz Residuallast besonders bei kaltem Winterwetter mit wenig Wind abgerufen wird. *„Insbesondere bei kältebedingt hoher Stromnachfrage steht das zukünftige Stromsystem vor der Herausforderung, wie die Stromnachfrage sicher bedient werden kann, ohne die politischen Ziele für Klimaschutz und Erneuerbaren-Zubau zu gefährden“* (Huneke, Perez-Linkenheit, & Niggemeier, 2017).

In Zukunft ist also bei kaltem Wetter nicht nur die Stromnachfrage aufgrund der zahlreichen dezentralen Wärmepumpen groß (BWP, 2022), sondern durch Großwärmepumpen in Wärmenetzen wird der Stromverbrauch ebenfalls in die Höhe getrieben. Aufgrund der Abhängigkeit der Arbeitszahl von Wärmepumpen von der Außentemperatur ist der Leistungsbedarf von Großwärmepumpen sogar bei

kaltem Wetter besonders hoch. Es ist von daher für die Strom- wie auch die Wärmeversorgung hilfreich, thermische Kraftwerke, die im Winter Residuallast bereitstellen sollen, grundsätzlich als KWK-Kraftwerke zu errichten und sie in Wärmenetze einspeisen zu lassen. Sie erreichen so einen dreifachen Nutzen für die Stabilität der Energieversorgung:

- ▶ Durch die Stromerzeugung liefern sie die nötige Strommenge.
- ▶ Durch die Einspeisung von Abwärme in Wärmenetze tragen sie zur Deckung der bei kaltem Wetter besonders hohen Wärmenachfrage bei.
- ▶ Durch die so ggf. entstehende Möglichkeit, andere Wärmeerzeuger wie z.B. Großwärmepumpen phasenweise nicht für die Wärmebereitstellung zu nutzen, entlasten sie das Stromnetz zusätzlich.

Aus diesen einfachen Überlegungen folgt, dass thermische Residuallastkraftwerke grundsätzlich ihre Abwärme in Wärmenetze einspeisen sollten. Aber welche Art Kraftwerk wird hierfür benötigt. Die Kraftwerk Mehrum GmbH plant die Errichtung eines 1,2 GW<sub>el</sub> Gaskraftwerkes. Bei einem elektrischen Wirkungsgrad von 40 % würde dieses Kraftwerk ca. 1.800 MW Wärme in ein Wärmenetz einspeisen können. Nun liegt z.B. der Leistungsbedarf des Wärmenetzes der Landeshauptstadt Hannover bei ca. 600 MW, wovon ca. 200 bis 300 MW durch Spitzenlasterzeuger bereitgestellt werden bzw. werden könnten. Die Kraftwerksplanung in Mehrum ist daher gleich aus zwei Gründen mit einem klimaneutralen und effizienten Niedersachsen nicht kompatibel:

- (1) Am Standort Mehrum ist eine Abwärmenutzung aufgrund der isolierten Lage nicht möglich. Der Standort Mehrum ist damit grundsätzlich für Prozesse mit Abwärme wie den Betrieb eines thermischen Kraftwerks oder eine Elektrolyseanlage ungeeignet.
- (2) Statt eines 1,2 GW Residuallastkraftwerks sollte in kleineren Einheiten zwischen 50 bis 200 MW gedacht werden, so dass die Aufnahmefähigkeit von Wärmenetzen für die anfallende Abwärme gegeben ist.

Die Lösung z.B. für Niedersachsen könnte darin liegen, nicht ein Großkraftwerk mit 1,2 GW zu bauen, sondern eher mittelgroße Anlagen mit je 50 bis 200 MW im Bereich von Städten zu platzieren, die bereits über ein Wärmenetz verfügen oder eines errichten wollen. Da es kaum hilfreich sein dürfte, auch mit dem Bau der Residuallastkraftwerke auf den Abschluss der Wärmeplanungen zu warten, wären die Ergebnisse dieser Planung in Bezug auf den Neu- und Ausbau von Wärmenetzen in einem schnellen Verfahren abzuschätzen, um so im Rahmen der Kraftwerksplanung die Ergebnisse der Wärmeplanungen vorausschauend zu antizipieren. Nur so kann vermieden werden, weitgehend funktionsgleiche Spitzenlasterzeuger mehrfach – einmal für Strom und einmal für Wärme - errichten zu müssen.

### 6.5 Die Kopplung von Wasserwirtschaft und Wärmeversorgung

Ein weiterer wichtiger Ansatz zur Verbesserung der Wärmeversorgung ist die Kopplung von (Ab-) Wasserwirtschaft und Wärmeversorgung. Hier gibt es eine Reihe von Fragen zu klären, die auf der Schnittlinie von Wärmeversorgung und Wasser liegen:

**Genehmigung von Erdsondenbohrungen für Wärmepumpen:** Für diese Genehmigung ist oft die untere Wasserbehörde zuständig. Sie prüft neben der grundsätzlichen Genehmigungsfähigkeit auch den exakten Ort der Bohrung. Dabei hält sie sich in Niedersachsen oft an die 5-m Sollvorschrift (LBEG,

2012). Diese Vorschrift ist aber an Grundstücksgrenzen zu Straßen- und Verkehrsflächen unsinnig, da im Bereich dieser Flächen nicht mit Erdwärmebohrungen zu rechnen ist. Eine stärkere Sensibilisierung der Wasserbehörden für Angelegenheiten der Wärmeversorgung und Wärmeplanung scheint daher sinnvoll. Auch die Straßenbauverwaltungen sollten involviert werden, um ihr Desinteresse an Erdwärme zu bestätigen.

**Genehmigung der Wärmeentnahme aus Gewässern:** Fluss- und Seewasser-Wärmepumpen sind für die zukünftige Wärmeversorgung von hoher Bedeutung. Die für wasserrechtliche Genehmigungen und Erlaubnisse zuständigen Behörden auf Ebene des Bundes, des Landes und der Landkreise sollten auf die auf sie zukommenden Anforderungen der zukünftigen Wärmeversorgung vorbereitet werden. Gegenstand solcher Genehmigungen können sowohl die Errichtung von Entnahme- und Einleitungsbauwerken sein als auch die Beurteilung der Unbedenklichkeit der Entnahme von Wärme aus dem Gewässer betreffen.

**Genehmigung der Wärmegewinnung in Abwasserkanälen:** Auch die Stadtentwässerungsbetriebe sollten auf die auf sie zukommenden Anforderungen der zukünftigen Wärmeversorgung vorbereitet werden. Gegenstände, die einer Zustimmung durch die Entwässerungsbetriebe bedürfen, könnten sowohl die Errichtung von Wärmeentnahmebauwerken sein als auch die Beurteilung der Unbedenklichkeit der Entnahme von Wärme aus dem Kanalsystem betreffen.

## QUELLEN

- AG Energiebilanzen. (2021). *Anwendungsbilanzen zur Energiebilanz Deutschland. Detaillierte Anwendungsbilanzen der Endenergiesektoren für 2019 und 2020*. Berlin. Abgerufen von [https://ag-energiebilanzen.de/wp-content/uploads/2020/10/ageb\\_20v\\_v1.pdf](https://ag-energiebilanzen.de/wp-content/uploads/2020/10/ageb_20v_v1.pdf)
- AGFW e.V. (2023). *AGFW Hauptbericht 2022*. Frankfurt. Abgerufen von <https://www.agfw.de/zahlen-und-statistiken/agfw-hauptbericht>
- Agora Energiewende, & Fraunhofer IEG. (2023). *Roll-out von Großwärmepumpen in Deutschland Strategien für den Markthochlauf in Wärmenetzen und Industrie*. Berlin. Abgerufen von <https://www.agora-energiewende.de/veroeffentlichungen/roll-out-von-grosswaermepumpen-in-deutschland/>
- Altermatt, P. P., Clausen, J., Brendel, H., Breyer, C., Gerhards, C., Kemfert, C., ... Wright, M. (2023). Replacing gas boilers with heat pumps is the fastest way to cut German gas consumption. *Communications Earth & Environment*, 4, 1–8. <https://doi.org/10.1038/s43247-023-00715-7>
- Anonym. (2020). *Energieeffizienzstrategie für Niedersachsen Baustein: Gebäudesektor*. Abgerufen von <https://www.umwelt.niedersachsen.de/startseite/themen/energie/energieeffizienz/energieeffizienzstrategie/energieeffizienzstrategie-188669.html>
- Ariadne Projekt. (2021). *Deutschland auf dem Weg zur Klimaneutralität 2045. Szenarien und Pfade im Modellvergleich*. Potsdam. Abgerufen von <https://ariadneprojekt.de/publikation/deutschland-auf-dem-weg-zur-klimaneutralitaet-2045-szenarienreport/#weiterfuehrende-kapitel-110-appendix-modellbeschreibungen-glossar>
- Ariadne Projekt. (2022). *Deutschland auf dem Weg zur Klimaneutralität 2045. Szenarien und Pfade im Modellvergleich. Datentabelle XLSX*. Potsdam. Abgerufen von <https://ariadneprojekt.de/news/big5-szenarienvergleich/>
- Athenstaedt, F. (2023). *E-Mail: LWP statt Fernwärme*.
- Baunetz-Wissen. (2022). Jahresarbeitszahl. Abgerufen 22. Januar 2022, von Baunetz-Wissen website: <https://www.baunetzwissen.de/glossar/j/jahresarbeitszahl-46869>
- BCG. (2021). *Klimapfade 2.0*. Berlin. Abgerufen von <https://www.bcg.com/de-de/klimapfade>
- BDEW. (2020). *BDEW-Energiemarkt Deutschland 2020*. Berlin: Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e. V. Abgerufen von Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e. V. website: <https://www.bdew.de/energie/bdew-energiemarkt-deutschland-2020/>
- Bertram, E., Pärish, P., Mercker, O., Arnold, O., Tepe, R., & Rockendorf, G. (2014). *Hocheffiziente Wärmepumpensysteme mit Geo- und Solarthermie-Nutzung*. Emmertal.
- Best, I., Braas, H., Vaupel, T., Orozaljew, J., Vajen, K., & Jordan, U. (2021, 6). *Wärmeversorgung Kassel 2030 Vision*. Gehalten auf der Klimaschutzrat Kassel, Kassel. Kassel. Abgerufen von [https://www.kassel.de/umwelt-und-klimaschutz/klimaschutzrat-mit-themenwerkstaeten/massnahmenempfehlungen/themenfelder/energieversorgung/2021-EV\\_Konzeptentwurf-Klimaneutrale-Waermeversorgung.pdf](https://www.kassel.de/umwelt-und-klimaschutz/klimaschutzrat-mit-themenwerkstaeten/massnahmenempfehlungen/themenfelder/energieversorgung/2021-EV_Konzeptentwurf-Klimaneutrale-Waermeversorgung.pdf)
- BMWK, & BMWSB. (2022). *65 Prozent erneuerbare Energien beim Einbau von neuen Heizungen ab 2024 Konzeption zur Umsetzung*. Berlin. Abgerufen von [https://www.bmwsb.bund.de/SharedDocs/downloads/Webs/BMWSB/DE/veroeffentlichungen/bauen/konzeptpapier-65-prozent-ee.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=5](https://www.bmwsb.bund.de/SharedDocs/downloads/Webs/BMWSB/DE/veroeffentlichungen/bauen/konzeptpapier-65-prozent-ee.pdf?__blob=publicationFile&v=5)
- Brauers, H., Braunger, I., Hoffart, F., Kemfert, C., Oei, P.-Y., Präger, F., ... Troschke, M. (2021). *Ausbau der Erdgas-Infrastruktur: Brückentechnologie oder Risiko für die Energiewende?* <https://doi.org/10.5281/ZENODO.4536573>

## WÄRMEPUMPEN IN DER WÄRMEPLANUNG

- Briddigkeit, T. (2023, September). *Wärmepumpen an Klärwerken und Flüssen zur Gewinnung regenerativer Fernwärme*. Gehalten auf der Onlinetagung Flusswasser und Abwasser als Wärmequelle für Wärmepumpen in Wärmenetzen. Abgerufen von <https://www.borderstep.de/event/flusswasser-fuer-waermepumpen/>
- Bundesverband Wärmepumpe e.V. (2021). *Wie funktioniert die Wärmepumpe?* Abgerufen 6. Dezember 2021, von [www.waermepumpe.de](http://www.waermepumpe.de) website: <https://www.waermepumpe.de/waermepumpe/funktion-waermequellen/>
- Bundesverband Wärmepumpe e.V. (2023). *Absatzzahlen und Marktanteile*. Abgerufen 3. März 2023, von [www.waermepumpe.de](http://www.waermepumpe.de) website: <https://www.waermepumpe.de/presse/zahlen-daten/>
- Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft für Immissionsschutz. (2020). *Leitfaden für die Verbesserung des Schutzes gegen Lärm bei stationären Geräten*. Abgerufen von <https://www.lai-immissionsschutz.de/Veroeffentlichungen-67.html?command=downloadContent&filename=Leitfaden%252028.08.2013n.pdf>
- Bürger, V., Braungardt, S., & Miara, M. (2022). *Durchbruch für die Wärmepumpe. Praxisoptionen für eine effiziente Wärmewende im Gebäudebestand*. Freiburg i. Br. Abgerufen von <https://www.agora-energiewende.de/veroeffentlichungen/durchbruch-fuer-die-waermepumpe/>
- BWP. (2022). *BWP zum 2. Wärmepumpengipfel in Berlin*. Berlin: Bundesverband Wärmepumpe e.V.
- BWP. (2023). *Branchenstudie 2023: Marktentwicklung – Prognose – Handlungsempfehlungen*. Berlin. Abgerufen von <https://www.waermepumpe.de/presse/news/details/branchenstudie-2023/#content>
- BWP e.V. (2023a). *Kältemittel in Wärmepumpen*. Abgerufen 21. April 2023, von <https://www.waermepumpe.de/politik/foerder-und-ordnungspolitik/kaeltemittel-in-waermepumpen/>
- BWP e.V. (2023b, Mai 6). *Wärmepumpe—Realistisch betrachtet*. Twitter Thread. Abgerufen 20. Mai 2023, von <https://twitter.com/BWPev/status/1654962148202692614>
- Cadmus Group. (2022). *Residential ccASHP Building Electrification Study*. Waltham, MA. Abgerufen von [https://cadmusgroup.com/wp-content/uploads/2022/06/Residential-ccASHP-Building-Electrification-Study\\_Cadmus\\_Final\\_060322\\_Public.pdf](https://cadmusgroup.com/wp-content/uploads/2022/06/Residential-ccASHP-Building-Electrification-Study_Cadmus_Final_060322_Public.pdf)
- Carroll, P., Chesser, M., & Lyons, P. (2020). Air Source Heat Pumps field studies: A systematic literature review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 134, 110275. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110275>
- Clausen, J., Fichter, K., Kern, F., & Schmelzle, F. (2022). *Wasserstoff sparsam einsetzen. Erste Ergebnisse aus dem Vorhaben „Wasserstoff als Allheilmittel?“*. Policy Insights. Berlin. Abgerufen von <https://www.borderstep.de/publikationen/>
- Clausen, J., Hintemann, R., & Hinterholzer, S. (2022). *Wirtschaftlichkeit der Abwärmenutzung aus Rechenzentren in Deutschland. Update 2022*. [Hintergrundpapier]. Berlin: Borderstep Institut.
- Clausen, J., & Hinterholzer, S. (2023). *Wärmepumpen in Mehrfamilienhäusern*. Berlin: Borderstep Institut.
- CO2-Online. (2023). *Verteilung des witterungsbereinigten Verbrauchs für Raumheizung und Warmwasser (alle Bundesländer, 2002 bis 2022)*. Abgerufen 2. Oktober 2023, von [Wohnbaeude.info](http://www.wohnbaeude.info) website: <https://www.wohnbaeude.info/daten/#/heizen/bundesweit;main=allgemein;sub=verteilung>

- countryeconomy.com. (2023). Finland—Household electricity prices. Abgerufen 5. März 2023, von Countryeconomy.com/ website: <https://countryeconomy.com/energy-and-environment/electricity-price-household/finland>
- Dambeck, H., Ess, F., Falkenberg, H., Kemmler, A., Kirchner, A., Kreidelmeyer, S., ... Lechtenböhrer, S. (2021). *Klimaneutrales Deutschland 2045 Wie Deutschland seine Klimaziele schon vor 2050 erreichen kann*. Berlin: Prognos AG, Öko-Institut, Wuppertal Institut für Klima, Umwelt Energie. Abgerufen von Prognos AG, Öko-Institut, Wuppertal Institut für Klima, Umwelt Energie website: [https://static.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2021/2021\\_04\\_KNDE45/A-EW\\_209\\_KNDE2045\\_Zusammenfassung\\_DE\\_WEB.pdf](https://static.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2021/2021_04_KNDE45/A-EW_209_KNDE2045_Zusammenfassung_DE_WEB.pdf)
- Dena. (2021). *Dena-Leitstudie Aufbruch Klimaneutralität*. Berlin: Deutsche Energie-Agentur. Abgerufen von Deutsche Energie-Agentur website: [https://www.dena.de/fileadmin/dena/Publikationen/PDFs/2021/Abschlussbericht\\_dena-Leitstudie\\_Aufbruch\\_Klimaneutralitaet.pdf](https://www.dena.de/fileadmin/dena/Publikationen/PDFs/2021/Abschlussbericht_dena-Leitstudie_Aufbruch_Klimaneutralitaet.pdf)
- Destatis. (2022). Stromverbrauch der privaten Haushalte nach Haushaltsgrößenklassen. Abgerufen 21. März 2023, von <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/UGR/private-haushalte/Tabellen/stromverbrauch-haushalte.html>
- Deutsche Umwelthilfe. (2023). *Faktenpapier Wärmepumpe*. Radolfzell. Abgerufen von [https://www.duh.de/fileadmin/user\\_upload/download/Projektinformation/Energieeffizienz/W%C3%A4rmepumpen/230412\\_Faktenpapier\\_W%C3%A4rmepumpe\\_final.pdf](https://www.duh.de/fileadmin/user_upload/download/Projektinformation/Energieeffizienz/W%C3%A4rmepumpen/230412_Faktenpapier_W%C3%A4rmepumpe_final.pdf)
- Die Bundesregierung. (2023). *Gesetzentwurf der Bundesregierung Entwurf eines Gesetzes zur Änderung des Gebäudeenergiegesetzes, zur Änderung der Heizkostenverordnung und zur Änderung der Kehr- und Überprüfungsordnung*. Berlin. Abgerufen von <https://www.bmwsb.bund.de/SharedDocs/gesetzgebungsverfahren/Webs/BMWSB/DE/Gebäudeenergiegesetz-geg.html>
- Drachenfels, C. von. (2023a). *E-Mail Bedenken gegen Abwasserwärmenutzung*.
- Drachenfels, C. von. (2023b, September). *Abwasserwärme. Ein Baustein für die Kommunale Wärmewende*. Gehalten auf der Onlinetagung Flusswasser und Abwasser als Wärmequelle für Wärmepumpen in Wärmenetzen. Abgerufen von <https://www.borderstep.de/event/flusswasser-fuer-waermepumpen/>
- DWD. (2018). *Klimareport Niedersachsen. Fakten bis zur Gegenwart—Erwartungen für die Zukunft*. Hannover: Niedersächsisches Ministerium für Umwelt, Energie, Bauen und Klimaschutz, DWD.
- Energie Schweiz. (2017). *Wärmenutzung aus Abwasser*. Zürich. Abgerufen von [https://um.baden-wuerttemberg.de/fileadmin/redaktion/m-um/intern/Dateien/Dokumente/5\\_Energie/Energieeffizienz/Abwasserwaermenutzung/Leitfaden\\_Ratgeber/Leitfaden\\_Waerme\\_aus\\_Abwasser.pdf](https://um.baden-wuerttemberg.de/fileadmin/redaktion/m-um/intern/Dateien/Dokumente/5_Energie/Energieeffizienz/Abwasserwaermenutzung/Leitfaden_Ratgeber/Leitfaden_Waerme_aus_Abwasser.pdf)
- energie Schweiz, & Bundesamt für Energie. (2021). *Bericht «Feldmessungen von Wärme-pumpen-Anlagen. Heizsaison 2020/21»*. Iffingen und Bern. Abgerufen von <https://pubdb.bfe.admin.ch/de/suche?keywords=&q=Feldmessungen&from=&to=&nr>
- European Environmental Agency. (2021). Water temperature. Abgerufen 20. Mai 2023, von <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/water-temperature-2/assessment>
- European Parliament. (2023). *Energy Performance of Buildings Directive*. Brüssel. Abgerufen von [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/ATAG/2023/739377/EPRS\\_ATA\(2023\)739377\\_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/ATAG/2023/739377/EPRS_ATA(2023)739377_EN.pdf)
- Fraunhofer ISE. (2020). *Wärmepumpen in Bestandsgebäuden*. Freiburg. Abgerufen von [https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/downloads/pdf/Forschungsprojekte/BMWi-03ET1272A-WPsmart\\_im\\_Bestand-Schlussbericht.pdf](https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/downloads/pdf/Forschungsprojekte/BMWi-03ET1272A-WPsmart_im_Bestand-Schlussbericht.pdf)

## WÄRMEPUMPEN IN DER WÄRMEPLANUNG

- Funke, T., Hintemann, R., Kaup, C., Maier, C., Müller, S., Paulußen, S., ... Terrahe, U. (2019). *Abwärmenutzung im Rechenzentrum: Ein Whitepaper vom NeRZ in Zusammenarbeit mit dem eco – Verband der Internetwirtschaft e. V.* Berlin.
- Gierkink, M., Wagner, J., Czock, Lilienkamp, A., Moritz, Mi., Pickert, L., ... Fiedler, S. (2022). *Vergleich der „Big 5“ Klimaneutralitätsszenarien.* Köln. Abgerufen von <https://www.ewi.uni-koeln.de/de/publikationen/vergleich-big-5/>
- Hanke-Rauschenbach, R., & Peterssen, F. (2021, November). *Die Wasserelektrolyse als künftige Abwärmequelle: Eine Ersteinschätzung.* Gehalten auf der 7. BMU-Fachtagung „Klimaschutz durch Abwärmenutzung“, Frankfurt amMain. Frankfurt amMain. Abgerufen von <https://www.izes.de/de/content/die-wasserelektrolyse-als-k%C3%BCnftige-abw%C3%A4rmequelle-eine-ersteinsch%C3%A4tzung>
- Hintemann, R., & Clausen, J. (2018). *Bedeutung digitaler Infrastrukturen in Deutschland. Sozioökonomische Chancen und Herausforderungen für Rechenzentren im internationalen Wettbewerb.* Berlin. Verfügbar unter. Berlin. Abgerufen von [https://www.eco.de/wp-content/uploads/dlm\\_uploads/2018/06/DI\\_Studie.pdf](https://www.eco.de/wp-content/uploads/dlm_uploads/2018/06/DI_Studie.pdf)
- Huneke, F., Perez-Linkenheit, C., & Niggemeier, M. (2017). *Kalte Dunkelflaute: Robustheit des Stromsystems bei Extremwetter.* Berlin. Abgerufen von [https://www.greenpeace-energy.de/fileadmin/docs/pressematerial/170629\\_GPE\\_Studie\\_Kalte-Dunkelflaute\\_Energy-Brainpool.pdf](https://www.greenpeace-energy.de/fileadmin/docs/pressematerial/170629_GPE_Studie_Kalte-Dunkelflaute_Energy-Brainpool.pdf)
- Hüsing, F., Mercker, O., Hirsch, H., & Steinweg, J. (2017). *Solare Regeneration von Erdwärmekollektoren – Reduzierter Flächenbedarf bei hoher Effizienz.* Emmertal. Abgerufen von [file:///C:/Users/clausen/AppData/Local/Temp/05\\_Fabian\\_Huesing\\_TSQ\\_OTTI\\_Vollbeitrag.pdf](file:///C:/Users/clausen/AppData/Local/Temp/05_Fabian_Huesing_TSQ_OTTI_Vollbeitrag.pdf)
- Kompetenzzentrum Energie. (2017). *ABWÄRME AUS NIEDERSACHSEN Konzeptstudie zur wiederkehrenden Quantifizierung bestehender Abwärmepotenziale in Niedersachsen.* Osnabrück. Abgerufen von <https://www.umwelt.niedersachsen.de/download/122385>
- KPMG. (2023). *Waste Heat Beneath our Feet. Unlocking hidden wastewater heat resources in the transition to green towns and cities.* London. Abgerufen von <https://kpmg.com/uk/en/home/insights/2023/01/waste-heat-beneath-our-feet.html>
- Kriesi, R. (2017). *Bericht «Analyse von ErdwärmesondenanlagenBericht».* Wädenswil. Abgerufen von <https://pubdb.bfe.admin.ch/de/publication/download/8872>
- Landesamt für Steuern Niedersachsen. (2023). Grundsteuer-Viewer. Abgerufen 18. März 2023, von <https://grundsteuer-viewer.niedersachsen.de/b?stichtag=2021&flurstuecke=3846038000270182>
- LBEG. (2012). *Leitfaden Erdwärmenutzung in Niedersachsen Rechtliche und technische Grundlagen.* Hannover: Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie. Abgerufen von Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie website: [https://nibis.lbeg.de/doi/DOI.aspx?doi=10.48476/geober\\_24\\_2022](https://nibis.lbeg.de/doi/DOI.aspx?doi=10.48476/geober_24_2022)
- LBEG. (2023). *Geothermie—Geht das bei mir?* Hannover. Abgerufen von <https://nibis.lbeg.de/geothermie/>
- LEG. (2023). LEG-Wohnen. Das Unternehmen. Abgerufen 9. Mai 2023, von <https://www.leg-wohnen.de/unternehmen>
- Medienwerkstatt. (2023). Wärme für die Wärmepumpe (Video). Abgerufen 26. April 2023, von [http://www.medienwerkstatt-online.de/lws\\_wissen/vorlagen/showcard.php?id=19660](http://www.medienwerkstatt-online.de/lws_wissen/vorlagen/showcard.php?id=19660)

## WÄRMEPUMPEN IN DER WÄRMEPLANUNG

- Mellwig, P. (2021). *Gebäude mit der schlechtesten Leistung (Worst performing Buildings)—Klimaschutzpotenzial der unsanierten Gebäude in Deutschland*. Heidelberg: IFEU. Abgerufen von IFEU website: [https://www.gruene-bundestag.de/fileadmin/media/gruenebundestag\\_de/themen\\_az/bauen/PDF/210505-ifeu-kurzstudie-gebaeude-mit-schlechtester-leistung.pdf](https://www.gruene-bundestag.de/fileadmin/media/gruenebundestag_de/themen_az/bauen/PDF/210505-ifeu-kurzstudie-gebaeude-mit-schlechtester-leistung.pdf)
- MHKBD. (2022). *Bauordnungsrecht – Ausbau von Erneuerbaren Energien*. Düsseldorf: Ministerium für Heimat, Kommunales, Bau und Digitalisierung des Landes Nordrhein-Westfalen. Abgerufen von Ministerium für Heimat, Kommunales, Bau und Digitalisierung des Landes Nordrhein-Westfalen website: [https://www.hausundgrund-verband.de/fileadmin/root/media/downloads/2022/MHKBD\\_Runderlass\\_Abstandsflaechen\\_2022-12-16.pdf](https://www.hausundgrund-verband.de/fileadmin/root/media/downloads/2022/MHKBD_Runderlass_Abstandsflaechen_2022-12-16.pdf)
- Miara, M. (2022, April). *Potenziale und Hindernisse von Wärmepumpen*. Gehalten auf der Klimastadt:bauen ! 14. Bremerhavener Bauforum Wärmepumpen. Abgerufen von [https://gruene.berlin/fileadmin/BE/lv\\_berlin/01\\_Landesarbeitsgemeinschaften/LAG\\_Bauen/2022-04-27\\_Waermepumpen\\_Potenziale\\_und\\_Hindernisse\\_Miara.pdf](https://gruene.berlin/fileadmin/BE/lv_berlin/01_Landesarbeitsgemeinschaften/LAG_Bauen/2022-04-27_Waermepumpen_Potenziale_und_Hindernisse_Miara.pdf)
- Nibe. (2023). *Wärmepumpe & Nachbarn: Dieser Abstand zur Grundstücksgrenze ist Pflicht*. Abgerufen 18. März 2023, von *Wärmepumpe & Nachbarn: Dieser Abstand zur Grundstücksgrenze ist Pflicht*
- Nick, S. (2023). *E-Mail AW: Wärmepumpe im Mehrfamilienhaus*.
- Niedersächsische Staatskanzlei. (2023). *G e s e t z zur Änderung der Niedersächsischen Bauordnung und des Niedersächsischen Gesetzes zur Erleichterung der Schaffung von Wohnraum Vom 21. Juni 2023*. Hannover. Abgerufen von [https://www.niedersachsen.de/politik\\_staat/gesetze\\_verordnungen\\_und\\_sonstige\\_vorschriften/download-verkuendungsblaetter-108794.html](https://www.niedersachsen.de/politik_staat/gesetze_verordnungen_und_sonstige_vorschriften/download-verkuendungsblaetter-108794.html)
- Niedersächsisches Ministerium für Wirtschaft, Verkehr, Bauen und Digitalisierung, Stand: Juni 2023. (2023). *Grenzabstand von Wärmepumpen (WP), Stand: Juni 2023*. Hannover. Abgerufen von <https://www.mw.niedersachsen.de/download/196665>
- NMU. (2022). *Niedersächsische Energie- und CO<sub>2</sub>-Bilanzen 2020*. Hannover: Niedersächsisches Ministerium für Umwelt, Energie und Klimaschutz. Abgerufen von Niedersächsisches Ministerium für Umwelt, Energie und Klimaschutz website: [https://www.umwelt.niedersachsen.de/startseite/themen/energie/energie\\_amp\\_co2\\_bilanzen/energie-und-co2-bilanzen-6900.html](https://www.umwelt.niedersachsen.de/startseite/themen/energie/energie_amp_co2_bilanzen/energie-und-co2-bilanzen-6900.html)
- Paetzold, M. (2023). *Grundwissen für Klimaanlage: Was bedeutet was?* Abgerufen 26. April 2023, von *Klimaanlagen Guru* website: <https://www.klimaanlagen-guru.de/klimaanlage-was-bedeutet-was>
- Rosenow, J. (2023, April 17). *Wasserstoff ist wichtig – aber mit ihm zu heizen, bleibt ein Märchen*. Abgerufen 20. Mai 2023, von *Focus.de* website: [https://m.focus.de/klima/experten/energieexperte-jan-rosenow-wasserstoff-ist-wichtig-aber-mit-ihm-zu-heizen-bleibt-ein-maerchen\\_id\\_191343994.html](https://m.focus.de/klima/experten/energieexperte-jan-rosenow-wasserstoff-ist-wichtig-aber-mit-ihm-zu-heizen-bleibt-ein-maerchen_id_191343994.html)
- Ruhnau, O., Hirth, L., & Praktiknjo, A. (2019). Time series of heat demand and heat pump efficiency for energy system modeling. *Scientific Data*, 6(1), 189. <https://doi.org/10.1038/s41597-019-0199-y>
- Samweber, F. T. (2017). *Systematischer Vergleich Netzoptimierender Maßnahmen zur Integration elektrischer Wärmeerzeuger und Fahrzeuge in Niederspannungsnetze*. München. Abgerufen von <https://www.ffe.de/veroeffentlichungen/systematischer-vergleich-netzoptimierender-massnahmen-zur-integration-elektrischer-waermeerzeuger-und-fahrzeuge-in-niederspannungsnetze/>

- Schäfer, I. (2019, November). *Auswirkung der neuen VDI 4640, Blatt 2, auf die Planung*. Gehalten auf der 5. Willicher Praxistage Geothermie. Abgerufen von <file:///C:/Users/clausen/AppData/Local/Temp/Willicher%20VDI%202019.pdf>
- Schlömer, G. (2017). *Planung von optimierten Niederspannungsnetzen*. Hannover. Abgerufen von <https://www.repo.uni-hannover.de/handle/123456789/9113>
- Schwinghammer, F. (2012). *Thermische Nutzung von Oberflächengewässern*. Freiburg. Abgerufen von [http://www.hydrology.uni-freiburg.de/abschluss/Schwinghammer\\_F\\_2012\\_MA.pdf](http://www.hydrology.uni-freiburg.de/abschluss/Schwinghammer_F_2012_MA.pdf)
- Scientists for Future. (2022a). *Heizen mit Holz: Knapp, teuer und unerwartet klimaschädlich*. Berlin. Abgerufen von <https://de.scientists4future.org/keypoints-kommunale-waermewende/>
- Scientists for Future. (2022b). *Wärmenetze. Die klimaneutrale Wärmeversorgung für verdichtete Stadtgebiete*. Berlin. Abgerufen von <https://de.scientists4future.org/keypoints-kommunale-waermewende/>
- Scientists for Future. (2022c). *Wärmepumpen. Die klimaneutrale Wärmeversorgung im Neubau und für Bestandsgebäude*. Berlin. Abgerufen von <https://de.scientists4future.org/keypoints-kommunale-waermewende/>
- Scientists for Future. (2022d). *Wasserstoff in der Energiewende: Unverzichtbar, aber keine Universal-lösung*. Berlin. Abgerufen von <https://de.scientists4future.org/keypoints-kommunale-waermewende/>
- Seidel, C. (2023, September). *Das Wärmepotenziale der Flüsse in Deutschland*. Gehalten auf der Onlinetagung Flusswasser und Abwasser als Wärmequelle für Wärmepumpen in Wärmenetzen. Abgerufen von <https://www.borderstep.de/event/flusswasser-fuer-waermepumpen/>
- Sensfuß, F. (2022, November). *Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland*. Karlsruhe. Abgerufen von <https://www.langfristszenarien.de/enertile-explorer-de/index.php>
- Stadtwerke Lemgo. (2023). Die Lemgoer Strom- und Wärmeerzeugung. Abgerufen 20. Mai 2023, von <https://www.stadtwerke-lemgo.de/privatkundenbereich/ueber-uns/eigenerzeugung-strom-und-waerme>
- Stadtwerke Mannheim. (2022). R(h)ein mit der Wärme MVV installiert eine der größten Flußwärmepumpen Europas. Abgerufen 20. Mai 2023, von <https://www.mvv.de/ueber-uns/unternehmensgruppe/mvv-umwelt/aktuelle-projekte/mvv-flusswaermepumpe?category=0&question=1993>
- Stadtwerke Rosenheim. (2022). Erste von drei iKWK-Anlagen geht an den Start. Abgerufen 20. Mai 2023, von <https://www.swro.de/de/blog/ikwk-eroeffnung>
- Statista. (2023). Heizölverbrauch privater Haushalte in Deutschland in den Jahren 1990 bis 2020. Abgerufen 21. März 2023, von <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/250390/umfrage/heizolverbrauch-privater-haushalte-in-deutschland/>
- SULPU. (2023). *Sales statistics and charts for 2022*. Turku. Abgerufen von <https://drive.google.com/file/d/1-BcNbYIY5nAGCnejc9t7uNWE6EaWC2m-/view>
- TGA Fachplaner. (2023, April 29). Die Branche liefert fast 100 000 Wärmepumpen in Q1-2023 aus. Abgerufen 6. Mai 2023, von <https://www.tga-fachplaner.de/meldungen/waermepumpen-hochlauf-die-branche-liefert-fast-100-000-waermepumpen-q1-2023-aus>
- Traber, T., & Fell, H.-J. (2019). *Erdgas leistet keinen Beitrag zum Klimaschutz*. Berlin. Abgerufen von [http://energywatchgroup.org/wp-content/uploads/EWG\\_Erdgasstudie\\_2019.pdf](http://energywatchgroup.org/wp-content/uploads/EWG_Erdgasstudie_2019.pdf)

- TU Dresden. (2020). *Zertifikat für den Primärenergiefaktor der Fernwärme Dresden*. Dresden. Abgerufen von <https://www.drewag.de/wps/wcm/connect/drewag/2f7ca75f-b691-4eff-96b6-f6978bf3306e/primaerenergiefaktor-zentrales-fernheiznetz-dresden.pdf?MOD=AJPERES&CVID=nx5ytAN>
- Umweltbundesamt. (2022). Energiebedingte Emissionen [Text]. Abgerufen 2. September 2022, von Umweltbundesamt website: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/energie/energiebedingte-emissionen>
- Voigts, I. (2023, September). *Transformation der Wärmeversorgung—Lösungen für die Wärmewende in Hannover*. Gehalten auf der Energieforum 2023, Lüneburg. Lüneburg. Abgerufen von <https://www.leuphana.de/institute/insugo/energie-und-umweltrecht/veranstaltungen/energieforum/energieforum-2023.html>
- Wärmepumpen-Gipfel. (2022). *Eckpunktepapier zur Diskussion der Beschleunigung des Wärmepumpenhochlaufs—Vorhaben und Maßnahmen zum 2. Wärmepumpen-Gipfel* -. Berlin. Abgerufen von [https://www.waermepumpe.de/fileadmin/user\\_upload/waermepumpe/05\\_Presse/01\\_Pressemitteilungen/Eckpunktepapier\\_Waermepumpenhochlauf.pdf](https://www.waermepumpe.de/fileadmin/user_upload/waermepumpe/05_Presse/01_Pressemitteilungen/Eckpunktepapier_Waermepumpenhochlauf.pdf)
- Weber, A., Bley, H., & Wensch, L. (2023, September 4). Grünes Wunder? Gebäudeenergie: Die Renovierung Europas. Abgerufen 2. Oktober 2023, von MDR.de website: <https://www.mdr.de/wissen/green-deal-wohnen-heizen-renovieren-europa-104.html>
- Wien Energie. (2023, Februar 3). Baufortschritt: Europas leistungsstärkste Großwärmepumpen in Wien angekommen. Abgerufen 16. Mai 2023, von <https://www.wienenergie.at/press-release/baufortschritt-europas-leistungstaerkste-grosswaermepumpen-in-wien-angekommen/>
- Witte, H. (2019, Mai). *Nachbarschaftliche Beeinflussung von Geothermieanlagen: Methode zur Berechnung der nachbarschaftlichen Beeinflussung*. Gehalten auf der Nachbarschaftliche Beeinflussung von Geothermieanlagen:, Freiberg. Freiberg.
- WWF Deutschland. (2023). *Der Hammer-Heizungsdeal. Eine Modellrechnung: Gasheizung vs. Wärmepumpe*. Berlin. Abgerufen von <https://www.wwf.de/2023/august/der-hammer-heizungs-deal>