

Wärmepumpenanlagen Technologie - Wirtschaftlichkeit - Diffusionsfaktoren

Jens Clausen

Simon Hinterholzer



IMPRESSUM

KURZTITEL

WÄRMEPUMPENANLAGEN: Technologie, Wirtschaftlichkeit, Diffusionsfaktoren

AUTORINNEN UND AUTOREN

Jens Clausen (Borderstep Institut)

M clausen@borderstep.de

Simon Hinterholzer (Borderstep Institut)

VERLAG

© Borderstep Institut März 2022

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

Prinz Albrecht Ring 12 | 30657 Hannover | +49 (0)511 300 59 245 | www.borderstep.de

ZITIERVORSCHLAG

Clausen, J. & Hinterholzer, S. (2022). Wärmepumpenanlagen: Technologie, Wirtschaftlichkeit, Diffusionsfaktoren. Berlin: Borderstep Institut.

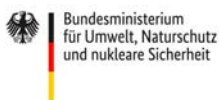
TITELBILD

© Bundesverband Wärmepumpe e.V.

FÖRDERMITTELGEBER

Das Projekt „Solare Wärmepumpe“ wird gefördert vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) im Rahmen der nationalen Klimaschutzinitiative

Im Auftrag des:



INHALTSVERZEICHNIS

Impressum.....	II
Inhaltsverzeichnis	III
Abbildungsverzeichnis	IV
Tabellenverzeichnis	IV
Zusammenfassung	1
1 Einführung	3
2 Die Wärmepumpe	6
2.1 Technologie	6
2.2 Die Nutzungsdauer von Wärmepumpenanlagen	8
2.3 Die Klimaschutzwirkung von Wärmepumpenanlagen	11
3 Wirtschaftlichkeit	15
3.1 Auswirkung der Leistungszahl auf den Preis der Wärme	15
3.2 Die Auswirkung von Strom- und CO ₂ -Preis auf den Preis der Wärme	17
3.3 Die Investitionskosten	19
3.4 Fazit Wirtschaftlichkeit	20
4 Diffusionsfaktoren	21
4.1 Erstellung von Fallprofilen der Diffusionsanalyse	21
4.2 Codesystem zur Erhebung der Einflussfaktoren	22
4.3 Diffusionsanalyse für Wärmepumpenanlagen	25
5 Diffusionsförderung	32
5.1 Kommunikation	34
5.2 Rechtliche und institutionelle Maßnahmen	35
5.3 Forschung und Entwicklung	36
Quellen.....	37

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Absatzzahlen von Wärmepumpen in Deutschland 2001 bis 2021 nach Wärmepumpentypen.....	4
Abbildung 2: Wärmepumpen Marktanteil in den Bundesländern in neu errichteten Wohngebäuden 2020	5
Abbildung 3: Funktionsprinzip der Wärmepumpe	6
Abbildung 4: Minimale Jahresmitteltemperatur in Abhängigkeit vom Alter der Sonden	10
Abbildung 5: CO ₂ -Emissionsminderungen Wärmepumpe im Vergleich zu einem Erdgaskessel plus Solaranlage.....	12
Abbildung 6: Monatliche Betriebskosten.....	18
Abbildung 7: Luftwärmetauscher auf der Terasse	26
Abbildung 8: Google Trend Analyse „Wärmepumpe“	31
Abbildung 9: Streudiagramm Diffusionsdynamik und Verbreitungsgrad für Wärmepumpen im Vergleich zu 130 umweltentlastenden Produkten und Dienstleistungen	32

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Kennzahlen der zu vergleichenden Gebäude	14
Tabelle 2: CO ₂ -Emissionsminderung durch Wärmepumpen in den Vergleichsgebäuden	14
Tabelle 3: Leistungszahl einer Wärmepumpe in Abhängigkeit vom Temperaturhub.....	16
Tabelle 4: Wärmekosten einer Wärmepumpe in Abhängigkeit vom Temperaturhub bei 22 Cent/kWh	16
Tabelle 5: Einflussfaktoren und Codierung der Diffusionsanalyse.....	22
Tabelle 6: Einflussfaktoren, Fakten und Codierung der Diffusionsanalyse für die Wärmepumpe	25

ZUSAMMENFASSUNG

Für eine klimaneutrale Heizung des Gebäudebestandes ist eine große Zahl von Wärmepumpen erforderlich. Zwar hat die Absatzzahl von Heizungs-Wärmepumpen in Deutschland 2021 erstmals die Zahl von 150.000 Wärmepumpen überschritten, für die Realisierung von Klimaneutralität in 2045 oder früher ist es aber erforderlich, dass gar keine Gas- und Ölheizung mehr verkauft werden und Fernwärmeanschlüsse und Wärmepumpen deren Marktanteile „übernehmen“ und in einer Stückzahl von deutlich über 700.000 pro Jahr installiert werden.

Die vorliegende Studie wurde im Projekt „Solare Wärmepumpe – heizen und kühlen mit Hilfe der Sonne“, gefördert vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) im Rahmen der nationalen Klimaschutzinitiative und koordiniert durch das Institut für Meteorologie und Klimatologie der Leibniz-Universität Hannover, erstellt. Sie dient zum einen als wissenschaftliche Vorstudie des auf die Verbreitung der Wärmepumpe gerichteten Projektes als projektinterne Wissensbasis. Sie untersucht aber auch einige Aspekte der Verbreitung von Wärmepumpen, die unserer Kenntnis nach in dieser Form bisher noch nicht publiziert wurden. Hierzu gehören insbesondere die Überlegungen in Kapitel 2.2 zur Nutzungsdauer von Wärmepumpenanlagen wie auch die systematische Analyse der Wirkung von 22 Einflussfaktoren auf die Diffusion von Wärmepumpen in Kapitel 4 und die Ableitung von Konsequenzen für weitere Maßnahmen der Diffusionsförderung in Kapitel 5. Drei zentrale Aktivitäten zur Förderung der Diffusion der Wärmepumpe konnten herausgearbeitet werden:

- (1)** Zum ersten ist es erforderlich, die Rahmenbedingungen der Energiepreise so zu verändern, dass sich Wärmepumpen in den allermeisten Anwendungsfeldern als wettbewerbsfähiger herausstellen aus fossile Verbrenner-Heizungen, siehe hierzu Bundesverband Wärmepumpe e.V. (2021) sowie die grundsätzlichen Überlegungen zur Ausrichtung des Energieversorgungssystems von Zachmann et al. (2022),
- (2)** Weiter sollte noch stärker über die relativen Vorteile und die Wirtschaftlichkeit der Wärmepumpe aufgeklärt werden. Eine solche Kommunikation muss letztlich in der Lieferkette sowohl auf die Konsumierenden als auch das Handwerk gerichtet sein.
- (3)** Ein zweiter Schwerpunkt der Kommunikation muss Kenntnisse über die Wärmepumpe vermitteln und in der Thematisierung von Bedenken in Bezug auf die Funktionalität und Sicherheit von Wärmepumpenlösungen liegen.

Aber nicht nur die Wärmepumpe selbst liegt im Zentrum von diffusionsfördernden Maßnahmen. Der Blick auf die Ergebnisse der Bewertung der Diffusionsdynamik zeigt drei Faktoren, mit denen die Akteure im Handwerk gestärkt und die Aktivitäten der Klimaschutzagenturen gezielt auf die zukünftigen Marktschwerpunkte ausgerichtet werden können.

- (1)** Die Ausbildung von Fachkräften für die Installation von Wärmepumpen bedarf hoher politischer Aufmerksamkeit. Der Mangel an Fachkräften und Bewerbern für eine Lehre darf nicht als Problem dem Handwerk allein überlassen bleiben.

- (2)** Ebenso muss durch Weiterbildung und Anreize erreicht werden, dass jeder Handwerksbetrieb, der Heizungen einbaut, auch das Thema Wärmepumpe beherrscht. Die Schwäche der Fachbetriebe bei der Planung und Realisierung von Wärmepumpen im Bestand bedarf ebenfalls der politischen Aufmerksamkeit.
- (3)** Weiter sollte durch die Intermediäre zumindest in Süddeutschland die Beschäftigung mit der Wärmepumpe für den Neubau beendet werden und die Kapazitäten auf die Wärmepumpe im Bestand verschoben werden. In Norddeutschland sind mit Blick auf die betrüblich geringe Verbreitung in Neubauprojekten dagegen die einschlägigen Anstrengungen auf beide Anwendungsbereiche auszuweiten.

Wir würden uns daher freuen, wenn die Publikation auch in der an Wärmepumpen interessierten Fachwelt auf Interesse stößt. Die Autoren danken Prof. Gunther Seckmeyer und Angelika Niedzwiedz von der Leibniz-Universität Hannover für die kritische Durchsicht und zahlreiche hilfreiche Anmerkungen.

1 Einführung

Zahlreiche Studien zeichnen eine Zukunft mit erneuerbarer und CO₂-freier Wärmeversorgung. Die Dena-Leitstudie „Integrierte Energiewende“ erstellt von der Deutschen Energieagentur (dena) sieht hierfür die Zahl der Wärmepumpen zur Gebäudeheizung auf bis zu 17 Millionen Stück steigen (Dena, 2018, S. Teil 8, 19). Bei einem Bestand von ca. 19 Mio. Gebäuden (Statistisches Bundesamt, 2018, S. 16) mit Wohnraum, entspräche dies einem Ausstattungsgrad von ca. 90 % aller Wohngebäude¹. Auch das Umweltbundesamt erwartet von Wärmepumpen in 2050 einen Beitrag von bis zu 75 % der Raumwärme- und Warmwasserversorgung (Umweltbundesamt, 2019, S. 173). Aber selbst wenn andere Studien wesentliche Anteile des Gebäudebestandes von bis zu 40 % mit Wärmenetzen versorgen wollen, z.B. die „Machbarkeitsstudie Kohleausstieg und nachhaltige Fernwärmeversorgung Berlin 2030“, (B E T Büro für Energiewirtschaft und technische Planung GmbH, 2019), die Studie „Wie werden Wärmenetze grün?“ (Agora Energiewende, 2019) und die Studie „Transformationsstrategien Fernwärme“ (AGFW e.V., 2014), ist eine hohe Bedeutung von Wärmepumpen für die zukünftige Wärmeversorgung unbestritten. Denn Wärmepumpen spielen nicht nur für die Versorgung von Einzelgebäuden eine wichtige Rolle, sondern sind auch wichtig, um innerhalb von Wärmenetzen das Temperaturniveau anzupassen. So sind z.B. in Stockholm mehr als 30 Rechenzentren an das Fernwärmenetz angeschlossen. Die Abwärme aus den Rechnern ist etwa 30°C warm und wird mit Großwärmepumpen auf die Wärmenetztemperatur von 70°C gebracht (Hintemann & Hinterholzer, 2020, S. 34).

Bisher spielen Wärmepumpen in der deutschen Wärmeversorgung aber nur eine kleine Rolle. Nur 2,6 % des Wohnungsbestandes werden heute schon durch eine Wärmepumpe beheizt (AGEB, 2021). Und während im Neubau in einigen Bundesländern die Wärmepumpe schon die dominante Technologie ist, spielt sie bei der Sanierung von Bestandsgebäuden nur eine Nebenrolle. Dennoch, schon im Jahr 2020 haben Hauseigentümer in über 30.000 Fällen einen Ölkessel durch eine Wärmepumpe ersetzt (Bundesverband Wärmepumpe e.V. (bwp), 2021, S. 2). Eine bundesweite Befragung von Wärmepumpennutzern zeigt, dass diese zwar hinsichtlich Bedienbarkeit, Komfort, Wartung und sogar bei den Heizkosten mehrheitlich zufrieden sind. Ca. 80 % der Wärmepumpen befinden sich aber eben in Neubauten, die einen hohen Energiestandard aufweisen und mit Flächenheizungen optimal auf die Wärmepumpe eingerichtet sind (Verbraucherzentrale Rheinland-Pfalz, 2019).

Die Verbreitung der Wärmepumpe wird unter anderem dadurch gehemmt, dass ihre Funktionsweise vielen Menschen nicht nur unbekannt, sondern auch unverständlich ist. Vertrauen in die Funktionsweise einer Technologie ist aber ein entscheidender Treiber der Diffusion von Umweltinnovationen (Clausen & Fichter, 2019). Auch der Bundesverband Wärmepumpe beklagte noch vor kurzer Zeit die geringe Bekanntheit der Wärmepumpe (Bundesverband Wärmepumpe e.V., 2019). Selbst über die erfahrenden Nutzenden der Wärmepumpe schreibt die Studie der Verbraucherzentrale Rheinland-Pfalz: „Es ist zu vermuten, dass für viele der Befragten die Wärmepumpe eine Art Blackbox ist. Ihnen ist nicht wirklich klar, ob es überhaupt bestimmte Anforderungen gibt und welche Bedingungen gut sind. Besonderes Interesse sich vertiefend mit der Funktionsweise der Wärmepumpe zu beschäftigen besteht nicht“ (Verbraucherzentrale Rheinland-Pfalz, 2019, S. 38).

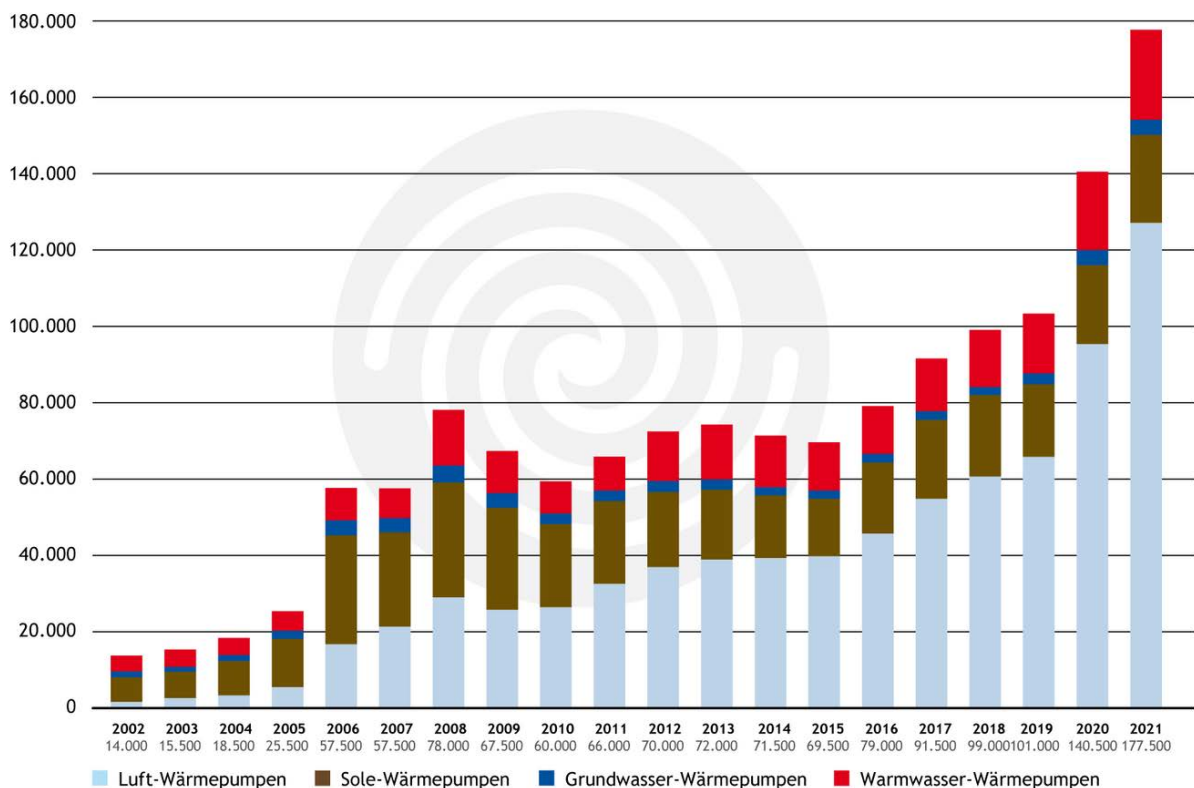
Sehr deutlich wird der Aufholbedarf der Wärmepumpe gegenüber anderen Heizsystemen in einer Umfrage des BDEW (Bundesverband der Energie und Wasserwirtschaft e.V., 2014, S. 48) unter 462

¹ Unter Einbeziehung von Nichtwohngebäuden ergeben sich noch größere Zahlen, es bleibt aber bei der Erkenntnis, dass die Wärmepumpe heute nur einen Bruchteil der Gebäude versorgt und in den 30er und 40er Jahren mindestens 10 Millionen Wärmepumpen einen sehr großen Anteil der Gebäude heizen werden.

Immobilieeigentümern, die eine Renovierung oder Modernisierung ihrer Heizungsanlage planen. Es wurde u.a. gefragt: „Angenommen, Sie würden sich heute neu für ein Heizsystem für Ihr Haus entscheiden. Mit welchem Heizsystem würden Sie Ihr Haus am liebsten hauptsächlich beheizen? Dabei kann es sich sowohl um ein einzelnes Heizsystem als auch um ein kombiniertes System handeln.“ Aus der Gruppe der Kostenorientierten (n=265) nannten 53,6 % die Erdgas-Brennwertheizung und nur 0,8 % die Wärmepumpe. Aber auch aus der Gruppe der Umweltorientierten (n=63) war die Erdgas-Brennwertheizung für 42,9 % das am häufigsten genannte System, die Wärmepumpe wurde nur von 1,6 % genannt. Die Mehrpreisbereitschaft für eine Wärmepumpenheizung bewegt sich in der Größenordnung von 1.500 bis 2.000 € und ist nur in der kleinen Gruppe der Umweltorientierten (ca. 14 %) etwas höher (Bundesverband der Energie und Wasserwirtschaft e.V., 2014, S. 51). Diese Gruppe speist sich, wie in zahlreichen anderen Studien auch gefunden wurde, aus besser verdienenden und besser ausgebildeten Menschen (Bundesverband der Energie und Wasserwirtschaft e.V., 2014, S. 61).

Erfreulich ist, dass die Zahl der installierten Wärmepumpen seit einigen Jahren wieder einmal deutlich steigt und besonders durch die im Jahr 2019 verbesserten Förderbedingungen im Jahr 2021 erstmals knapp 180.000 Stück erreichte.

Abbildung 1: Absatzzahlen von Wärmepumpen in Deutschland 2001 bis 2021 nach Wärmepumpentypen



Quelle: Bundesverband Wärmepumpe (2022a)

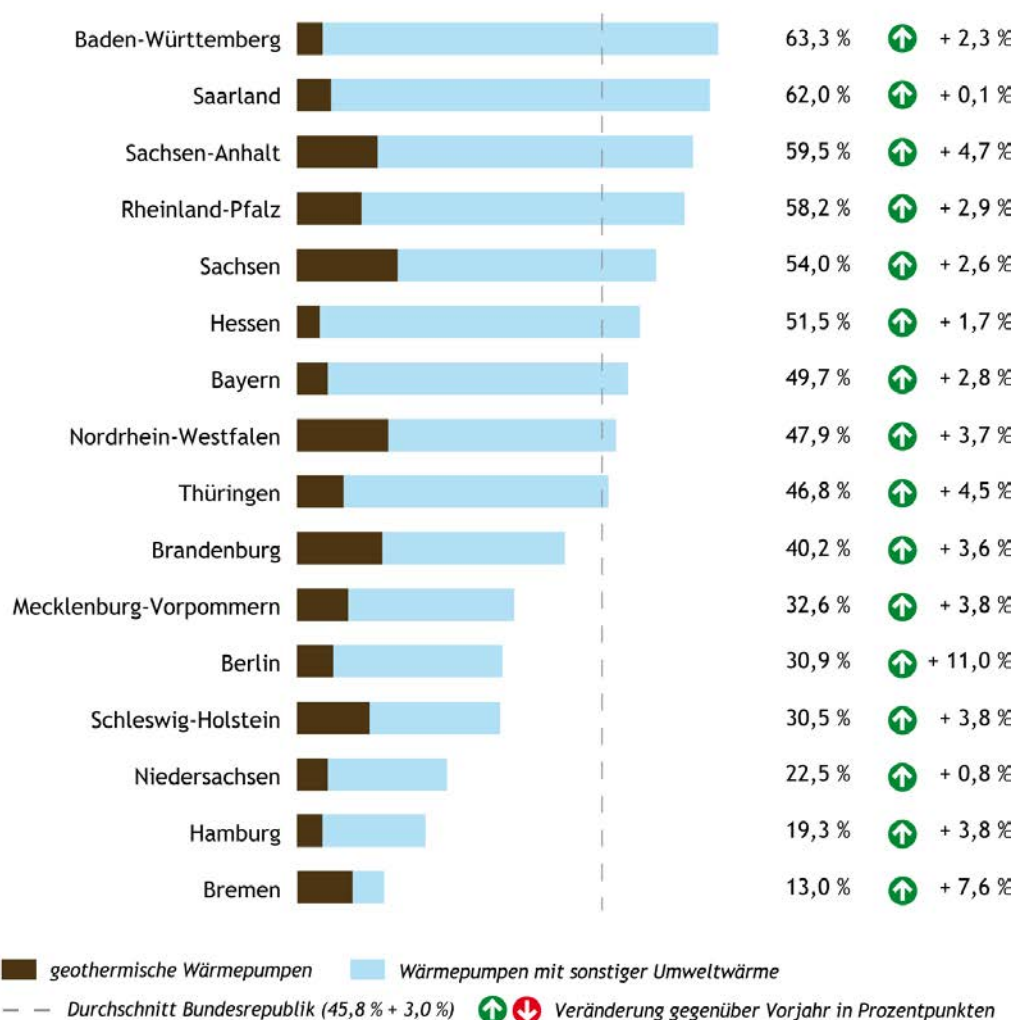
Die Grafik zeigt aber auch, dass der Marktanteil von erdgekoppelten Wärmepumpen langsam zurückgeht. Lag er 2006 noch bei über 50 % so ist er bis 2021 auf ca. 15 % der Heizungswärmepumpen gefallen.

WÄRMEPUNGENANLAGEN: Technologie, Wirtschaftlichkeit, Diffusionsfaktoren

Bei einer insgesamt in Deutschland im Jahr 2020 abgesetzten Zahl von Wärmeerzeugern von 842.000 ergibt sich ein Marktanteil der Wärmepumpe von um die 18 %. Über 80 % aller neu eingebauten Heizungen sind also nach wie vor fossile Verbrenner-Heizungen (Bundesverband der Deutschen Heizungsindustrie (BDH), 2021a).

Zudem scheint es die Wärmepumpe in den norddeutschen Ländern schwer zu haben. Zahlen des Bundesverband Wärmepumpe lassen ein starkes Gefälle der Wärmepumpen-Marktanteile im Neubau von 63,3 % in Baden-Württemberg bis runter auf 13 % in Bremen erkennen.

Abbildung 2: Wärmepumpen Marktanteil in den Bundesländern in neu errichteten Wohngebäuden 2020



Anteil an den Heizsystemen neuerrichteter Gebäude.

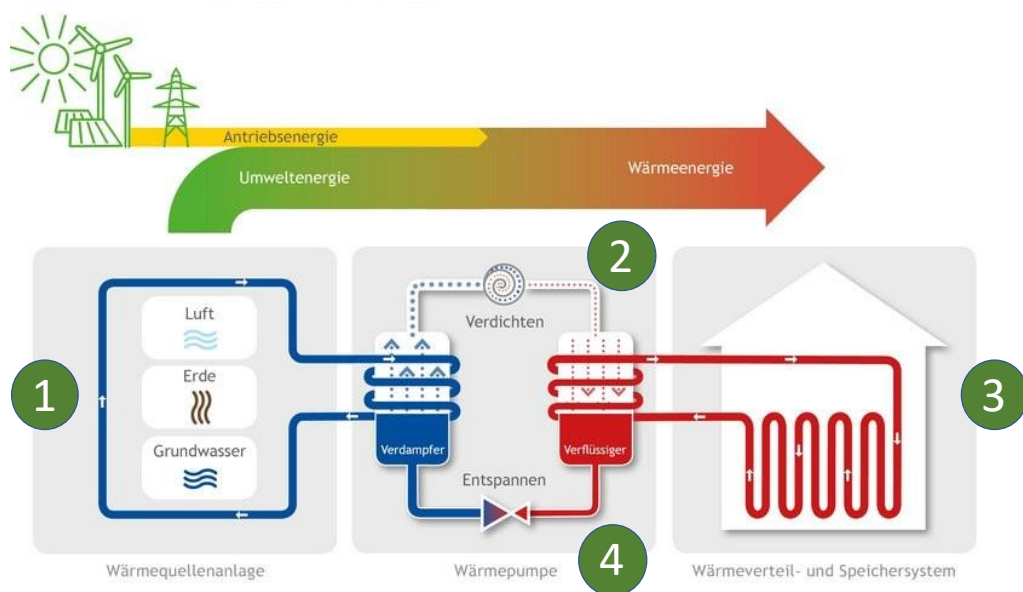
Quelle: Bundesverband Wärmepumpe (2022a)

2 Die Wärmepumpe

2.1 Technologie

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. (2021c) stellt das Funktionsprinzip der Wärmepumpe wie folgt grafisch dar:

Abbildung 3: Funktionsprinzip der Wärmepumpe



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

Durch die **Wärmequellenanlage (1)** wird die Wärmeenergie der Umwelt (Luft, Erdwärme, Grundwasser) 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.

Schritt 3 – Die Wärmeverteilung: Das Medium hat hinter dem Verdichter eine Temperatur erreicht, mit der man heizen kann. Es durchströmt einen Wärmetauscher² und erhitzt Wasser, welches nun die Heizkörper, eine Fußboden- oder Wandheizung³ durchströmt und die Wärme an die Wohnräume abgibt.

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.

Zum einen ist dies 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 10 kW erforderlich und Altbauten können noch höhere Leistungen erfordern. Für größere Gebäude stehen Wärmepumpen mit 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 Wärmeverteilsystems.

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 ab. Aussagekräftiger ist daher die JAZ. Vereinfacht ausgedrückt ist die JAZ der Quotient aus erzeugter Heizwärme 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.

² 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.

³ 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 und Wandheizungen** auf 30 °C bis 35 °C zu erwärmen.

Eine für ein Gebäude optimale Wärmepumpe:

- ▶ hat eine möglichst niedrige Leistung, da eine zu große Dimensionierung eine schlechtere Effizienz mit sich bringt.
- ▶ Außerdem ist es gut, wenn die Anlage eine möglichst warme Quelle für Umgebungswärme nutzt. So lässt sich z.B. Wärme aus einer 10°C warmen Erdwärmebohrung 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 ausreicht. Von hohem Einfluss ist hier z.B. eine Flächen- oder Wandheizung, für die oft eine Vorlauftemperatur von 30°C bis 35°C ausreicht, statt konventionelle Heizkörper, die je nach Größe 55°C bis 65°C Vorlauftemperatur für die Wärmeverteilung erfordern.

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“ Erdwärmebohrung gegenüber eine Luft-Luft Wärmepumpe weiter verringern dürfte.

2.2 Die Nutzungsdauer von Wärmepumpenanlagen

Wärmepumpenanlagen erfordern nicht unerhebliche Investitionen. Diese Investitionen sollen über lange Zeiten abgeschrieben werden. Die Haltbarkeit der einzelnen Komponenten einer Wärmepumpenanlage ist daher eine kritische Variable für die Finanzierung. Aber die Haltbarkeit ist nicht nur wichtig für den ökonomischen Erfolg einer Investition, sie ist auch ein wesentlicher Unsicherheitsfaktor, der das Vertrauen in die Technologie der Wärmepumpe erschüttern kann. Wie lange eine Erdwärmebohrung ergiebig bleibt, wie lange eine Wärmepumpe hält und wie lange eine Flächenheizung nutzbar bleibt, wird daher im folgenden Absatz thematisiert.

Das Rathaus von Zürich steht direkt am Fluss Limmat. In den Jahren 1937 bis 1938 wurde eine Flusswasser-Wärmepumpe eingebaut, die die ursprünglichen Holzöfen ersetzte (Schwinghammer, 2012, S. 30ff). Diese Wärmepumpe mit einer Heizleistung von 66 kW war 63 Jahre lang in Betrieb. Bei einer Sanierung im Jahr 2001 wurde dann eine neue und effektivere Wärmepumpe eingebaut. Die alte Anlage, die mittlerweile unter Denkmalschutz steht, ist aber noch immer arbeitsfähig und wird jeden Monat einmal eingeschaltet, um Alterungserscheinungen vorzubeugen. Das Beispiel des Rathauses in Zürich zeigt, dass hochwertige Wärmepumpen unter guten Bedingungen sehr lange nutzbar sein können.

Das Rathaus von Zürich verfügt über eine funktionsfähige Wärmepumpe mit dem Baujahr 1938. Bis 2001 war diese Wärmepumpe 63 Jahre lang die zentrale Heizungsanlage des Rathauses.

Letztlich ist aber eine Wärmepumpenanlage immer ein System. Soll das System lange nutzbar sein, dann muss sowohl die Wärmequelle (also Luftwärmetauscher oder Erdwärmebohrung), die Wärmepumpe und das Wärmeverteilsystem lange halten. Da sowohl Luftwärmetauscher wie auch Heizungsrohre und Konvektorheizkörper reparierbar sind oder ausgetauscht werden können, sind die kritischen Elemente:

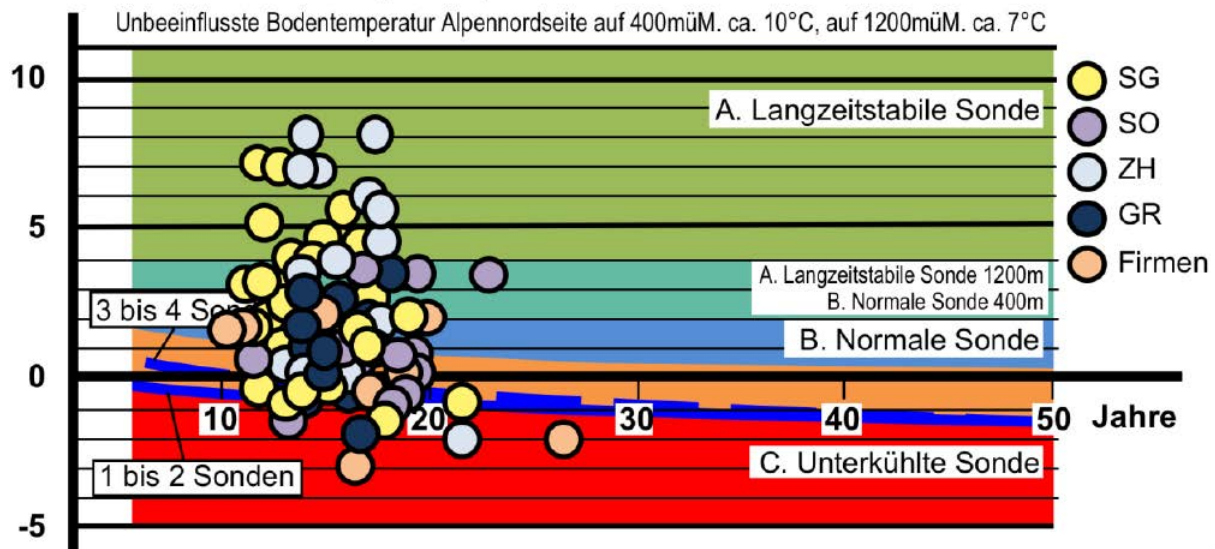
- ▶ die Erdwärmebohrung,
- ▶ die Wärmepumpe selbst sowie
- ▶ die Flächenheizung in Wand oder Fußboden.

Insgesamt ist das Thema Lebens- oder Nutzungsdauer bisher wenig untersucht. Der zentrale Grund dafür dürfte sein, dass die Zahl der insgesamt installierten Wärmepumpen erst ab dem Jahr 1995 nennenswerte Größenordnungen erreichte. Bei Lebensdauererwartungen von 20 bis 25 Jahren für die Wärmepumpe und bis zu 100 Jahren für die Ergiebigkeit der Erdwärmebohrung (Bundesverband Wärmepumpe.e.V., 2016, S. 12) können nach einer so kurzen Zeit allenfalls erste und eher negative Erfahrungen vorliegen. So macht z.B. die Studie „Wärmepumpen in Bestandsgebäuden“ zwar sowohl Aussagen zum Alter der Gebäude als auch zum Alter der Wärmepumpen (Fraunhofer ISE, 2020, S. 36, 42), die vergleichsweise neuen Anlagen mit einem Alter von maximal ca. 10 Jahren lassen aber Rückschlüsse auf die zu erwartende Gesamtlebensdauer nicht zu. Die Lebensdauer von Wärmepumpen wird daher unter Berufung auf die VDI 2067 oft pauschal mit 20 Jahren angesetzt (Fraunhofer ISE, 2020, S. 102); allerdings deuten grundsätzliche Überlegungen auf mögliche längere Lebensdauern hin, die aber noch empirisch nachzuweisen wären. Über die mögliche Nutzungsdauer der Erdwärmebohrung werden keine Aussagen gemacht. PricewaterhouseCoopers setzt in seiner Untersuchung zur Heizungsindustrie pauschal eine Lebensdauer von 25 Jahren an (Pricewaterhouse Coopers, 2020, S. 27). Sabel (2021) verweist auf das Material, also den Kunststoff der Verrohrung der Erdsonden und entsprechende Tests und Simulationen der Hersteller, die auf eine Nutzungsdauer von 100 Jahren hindeuten. Neben dem Materialverschleiß hänge aber die korrekte Funktion der Bohrung auch von der fachgerechten Planung ab. Nicht fachgerechte Planung (Fischer & Then, 2018) könne z.B. durch zu knappe Dimensionierung dazu führen, dass die Sonde nicht nachhaltig betrieben werden könne und der Untergrund auskühlt.

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 12 % 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 4).

Abbildung 4: Minimale Jahresmitteltemperatur in Abhängigkeit vom Alter der Sonden



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

Besonders mit Blick auf die mit der Gewinnung solarer Energie gekoppelte Wärmepumpe erweisen sich die Untersuchungen von Kriesi als bedeutungsvoll. Denn 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 27 Jahren. Eine Abhängigkeit der minimalen mittleren Sondentemperatur von der Sondentiefe (von 55 m bis 300 m) kann Kriesi überhaupt nicht erkennen (Kriesi, 2017, S. 25).

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

Vielmehr scheint die Anzahl nahe gelegener Sonden einen starken Einfluss auf die Mitteltemperatur zu haben. So ermittelt Kriesi, dass Erdwärmesonden mit 3 bis 6 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. 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 Möglichkeiten der Regeneration mit Solarwärmekollektoren stehen auch im Mittelpunkt zweier Arbeiten des Instituts für Solarenergieforschung Hameln (IFSH) zur thermischen Stabilität von Erdwärmepumpen (Bertram et al., 2014) und zu Flächenkollektoren (Hüsing et al., 2017). Bei Erdwärmepumpen sind Bertram et al. (2014, S. 2) sehr optimistisch, dass sich durch thermische Regeneration eine langfristige Temperaturabsenkung im Erdreich erfolgreich unterbinden lässt, selbst wenn naheliegende weitere Sonden vorhanden sind. Die Regeneration von Flächenkollektoren wurde von Hüsing et al. auch mit dem Ziel untersucht, den Flächenbedarf zu reduzieren und so den Einsatz in verdichteten Gebieten intensivieren zu können (Hüsing et al., 2017, S. 11). Alle Lösungen erfordern allerdings in teils erheblichem Ausmaß Elektrizität als Antriebsenergie. Hier dürfte die Kopplung von Photovoltaik und Wärmepumpe eine gute Lösung sein.

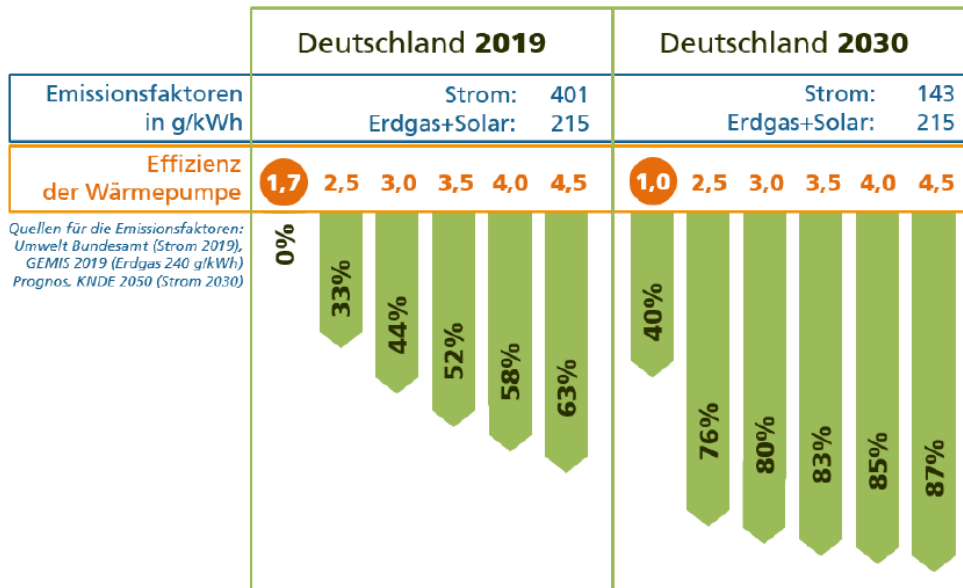
Mit Blick auf Flächenheizungen führt Grimm (2021) aus, die Lebensdauer würde nach VDI mit 50 Jahren kalkuliert. Dies sei der längste reguläre Nutzungszeitraum für Heizungstechnik. Die Rohre werden ebenfalls auf eine Standzeit von mindestens 50 Jahren plus Sicherheitsreserve getestet. Es gibt leider keine Prüfverfahren, die einen längeren Zeitraum abbilden. In der Branche seien viele Anlagen aus der Anfangszeit der Fußbodenheizung in den 70er und 80er Jahren bekannt, die zumeist problemlos laufen. Bei fachgerechter Montage korrodieren die Rohre nicht, werden nicht undicht und haben keine Abnutzungserscheinungen. Die Lebensdauer der Rohre schätzt Grimm (2021) auf 60 bis 100 Jahre. Die Regelungstechnik und der Heizkreisverteiler habe eine kürzere Lebensdauer von 25 bis 50 Jahren, könne aber leicht und kostengünstig ausgetauscht werden.

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

2.3 Die Klimaschutzwirkung von Wärmepumpenanlagen

Marek Miara, Koordinator der Wärmepumpenforschung am Fraunhofer-Institut für solare Energiesysteme, stellt die durch eine Wärmepumpenanlage möglichen CO₂-Emissionsminderungen im Vergleich zu einem Erdgaskessel plus Solaranlage im Vergleich für die Jahre 2019 und 2030 dar.

Abbildung 5: CO₂-Emissionsminderungen Wärmepumpe im Vergleich zu einem Erdgaskessel plus Solaranlage



Quelle: Miara (2021a, S. 38)

Aufgrund des in den nächsten Jahren voraussichtlich sinkenden CO₂-Emissionsfaktors der Stromerzeugung wird der relative Vorteil dieser Lösung kontinuierlich größer werden. In 2030 erwartet Miara, dass selbst eine Wärmepumpe mit einer Leistungszahl von 1 (was quasi einer Stromdirektheizung entspricht) günstiger abschneidet als eine fossile Gasheizung (vgl. Abbildung 5).

Die Scheinobjektivität von gesetzlich festgelegten Emissionsfaktoren

Zur Beurteilung der Wärmeversorgung von Gebäuden werden vielerorts sogenannte Emissionsfaktoren herangezogen, also Werte, die die Menge der CO₂-Emissionen aus der Nutzung verschiedener Energieträger wiedergeben. Alleine das Gebäudeenergiegesetz in seiner aktuellen Fassung enthält in Anlage 9 Emissionsfaktoren für 25 verschiedene Energieträger, davon 13 regenerative (Bundesregierung, 2020). Die Kennwerte finden z.B. Anwendung bei der Ausstellung von Energiebedarfsausweisen. In der Anlage 9 des Gebäudeenergiegesetzes werden u.a. die Emissionsfaktoren für Heizöl (310 gCO₂eq/kWh), Erdgas (240 gCO₂eq/kWh) und Netzstrom (560 gCO₂eq/kWh) aufgeführt. Würde für die Beheizung eines Gebäudes alternativ je eine kWh Heizöl oder Erdgas bzw. eine halbe kWh Netzstrom (mit einer Wärmepumpe mit der Jahresarbeitszahl von 2) erforderlich sein, so wäre Erdgas hier mit spezifischen Emissionen von 240 gCO₂eq/kWh etwas klimafreundlicher als eine mit Netzstrom betriebene Wärmepumpe mit 280 gCO₂eq/kWh. Nimmt man einfach die Werte aus dem GEG, scheint die Sache einfach.

Die technischen Kennwerte sind jedoch keineswegs unumstritten und verändern sich auch im Zeitverlauf. Brauers et al. (2021) veranschlagen z.B. die Treibhauswirkung der Verwendung von Erdgas unter Einbezug des sogenannten „Methanschlupfs“ in der Lieferkette deutlich höher als bisher üblich und stufen es noch oberhalb von Heizöl auf der Stufe von Kohle ein. Hinzu kommt die Problematik, dass sich abhängig von der Quelle (Russland über Pipeline, aus Übersee als LNG oder über Pipeline aus den Niederlanden) die effektiven Emissionen von Erdgas deutlich unterscheiden

(Brauers et al., 2021, S. 4). Traber und Fell (2019, S. 13) setzen für Durchschnitts-Erdgas genau wie für Heizöl 410 gCO₂eq/kWh an.

Das Umweltbundesamt dokumentiert für den Deutschen Strommix Emissionsfaktoren, die mit steigenden Anteilen an regenerativem Strom fallen. Für 1990 werden 764 gCO₂eq/kWh dokumentiert, für das Jahr 2000 noch 644 gCO₂eq/kWh, für 2010 dann 555 gCO₂eq/kWh und für das Jahr 2020 werden nur noch 366 gCO₂eq/kWh geschätzt. Mit weiter steigendem Anteil an regenerativer Stromerzeugung wird sich diese Tendenz fortsetzen. Die Ampelkoalition plant, den Anteil regenerativer Stromerzeugung von gegenwärtig ca. 45 % bis 2030 auf ca. 80 % zu erhöhen (SPD, Die Grünen, & FDP, 2021, S. 56), was zu spezifischen Emissionen von unter 200 gCO₂eq/kWh führen müsste.

Auf Basis der veränderten Werte ändert sich auch das Ergebnis unseres Systemvergleichs. Würde für die Beheizung eines Gebäudes im Jahr 2030 alternativ je eine kWh Heizöl oder Erdgas bzw. eine halbe kWh Netzstrom (mit einer Wärmepumpe mit der Jahresarbeitszahl von 2) erforderlich sein, so wäre Erdgas mit den erhöhten spezifischen Emissionen nach Traber und Fell von 410 gCO₂eq/kWh keine Option mehr im Vergleich zur deutlich klimafreundlicheren, mit Netzstrom betriebenen Wärmepumpe mit in 2030 nur noch 100 gCO₂eq/kWh. Die scheinbare Objektivität ingenieurwissenschaftlicher Vergleichsverfahren lässt sich so in ein anderes Licht setzen.

Darf man aber zukünftige und damit noch unsichere Entwicklung zum Ausgangspunkt „objektiver“ technischer Entscheidungen machen? Es mag hier noch bedacht werden, dass eine heute installierte Heizungsanlage nach ca. 25 Betriebsjahren erst um das Jahr 2046 wieder außer Betrieb gesetzt werden wird. Den Vergleich auf das Jahr 2030 zu beziehen scheint also deutlich objektiver, als wie im GEG vorgesehen, Vergleichswerte aus dem Jahr 2010 zugrunde zu legen.

Als beispielhafte Abschätzung der Klimaschutzwirkung einer Wärmepumpenanlage werden im Folgenden zwei Gebäude mit einem unterschiedlichen Wärmebedarf sowie zwei Arten von Wärmepumpen betrachtet. Zum einen ein saniertes Gebäude mit ca. 10.0000 kWh Wärmebedarf, das für den Einbau einer Erdwärmepumpe geeignet ist, zum anderen ein noch wenig saniertes Gebäude mit ca. 30.0000 kWh Wärmebedarf, in welches eine Luft-Luft-Wärmepumpe mit niedriger Leistungszahl⁴ eingebaut werden muss.

⁴ Die Jahresarbeitszahlen sind im Vergleich zu den von Fraunhofer ISE (2020) dokumentierten und in Bestandsgebäuden empirisch ermittelten Werten niedrig angesetzt.

Tabelle 1: Kennzahlen der zu vergleichenden Gebäude

	Beispiel A	Beispiel B
Wärmebedarf in kWh/a	10.000	30.000
Leistungszahl (Wärmepumpe)	3,2	2,6
Stromverbrauch der Wärmepumpe pro Jahr in kWh	3.125	11.500

Des Weiteren werden die Treibhausgasemissionen für Heizöl bei ca. 266 g CO₂/kWh und für Strom im deutschen Strommix in 2018 noch bei ca. 468 g CO₂/kWh (Umweltbundesamt, 2020) angenommen. Bis 2030 werden sich die spezifischen Emissionen der Stromerzeugung in etwa auf 279 g CO₂/kWh fast halbieren (Umweltbundesamt, 2017). Bei einer zusätzlichen Installation von Solarmodulen durch den Besitzer würden sich diese spezifischen Emissionen noch weiter reduzieren.

Auf Basis dieser Annahmen kann folgende Einsparung an Treibhausgasen errechnet werden.

Selbst Wärmepumpen mit niedriger Leistungszahl mindern die CO₂-Emissionen gegenüber einer Öl- oder Gasheizung deutlich. Mit steigendem Anteil an regenerativem Strom wird der Vorteil im Laufe der Zeit größer.

Tabelle 2: CO₂-Emissionsminderung durch Wärmepumpen in den Vergleichsgebäuden

	Haustyp A	Haustyp B	Einheit
CO ₂ -Ausstoß der Ölheizung pro Jahr	2,66	7,98	t CO ₂
CO ₂ -Ausstoß mit Wärmepumpe pro Jahr (2030)	0,87	3,21	t CO ₂
CO₂-Minderung pro Jahr pro Haus	1,79	4,77	t CO₂

Aus den obigen Berechnungen lässt sich erkennen, dass das energetische Einsparpotential durch Wärmepumpe und regenerativ erzeugten Strom für schlechter sanierte Häuser sogar deutlich über dem Einsparpotential für gut sanierte Häuser liegt. Natürlich ist eine gute Sanierung vorzuziehen, aber sie geschieht derzeit mit einer Sanierungsrate von etwa 1 % zu langsam, um noch gegen die sich schnell zuspitzende Klimakrise wirken zu können. Die Kombination aus Solarenergie und der durch den Klimawandel in Zukunft notwendigen Kühlung steigert das Energieeinsparpotential weiter und sorgt gleichzeitig für eine ständige Regeneration der Erdwärmesonde.

3 Wirtschaftlichkeit

Die Wirtschaftlichkeit einer Wärmepumpenanlage ist von mehreren Faktoren abhängig. Diese sind:

- ▶ Die Leistungszahl und die Jahresarbeitszahl, die im praktischen Betrieb erreicht werden.
- ▶ Der Strompreis, der für den Wärmepumpenstrom gezahlt werden muss.
- ▶ Die Investitionskosten.

In den folgenden Abschnitten werden diese drei Einflussfaktoren im Detail betrachtet.

3.1 Auswirkung der Leistungszahl auf den Preis der Wärme

Die Auswirkung der Temperatur der Wärmequelle sowie der nötigen Vorlauftemperatur⁵ der Wärmeverteilung im Gebäude auf die Leistungszahl (abgekürzt COP und ausgeschrieben "Coefficient of Performance") einer Wärmepumpe (WP) lässt sich rechnerisch zeigen (Baehr & Kabelac, 2016, S. 573ff). Als Variablen gehen in diese Rechnung das hohe Temperaturniveau T_h des Vorlaufs der Heizung (in Kelvin) sowie der Temperaturhub $T_h - T_n$ ⁶ ein. Hinzu kommt der Faktor ζ_{wp} , der die real auftretenden Verluste gegenüber einem physikalisch idealen/reversiblen Carnotprozess widerspiegelt und für viele Wärmepumpen (ζ_{WP}), zwischen 0,35 und 0,5 liegt (Arpagaus, Bless, Uhlmann, Schiffmann, & Bertsch, 2018, S. 4).

$$COP = \zeta_{wp} * T_h / (T_h - T_n)$$

Unter Annahme eines Wertes von 0,4 für ζ_{wp} ergeben sich in Abhängigkeit von der Temperatur der Abwärmequelle und der zu erzielenden Vorlauftemperatur für die Wärmeverteilung folgende Werte für die theoretische Leistungszahl:

⁵ Der Begriff Vorlauftemperatur bezeichnet in der Heizungstechnik diejenige Temperatur, mit der Heizwasser in einen Wärmekreislauf eingespeist wird. Das kann bei einer Gebäudeheizung die Temperatur des Heizwasser sein, welches erwärmt die Wärmepumpe verlässt, es kann aber auch in Wärmenetzen die Temperatur des Heizwassers sein, welches in das Wärmenetz eingespeist wird. Analog bezeichnet der Begriff Rücklauftemperatur die Temperatur des Heizwassers, welches auf der Wärmeverteilung zurückkommt. Je deutlicher die Rücklauftemperatur unter der Vorlauftemperatur liegt, desto mehr Wärme wurde pro Liter Heizwasser transportiert und desto effizienter arbeitet der Heizungskreislauf.

⁶ T_h bezeichnet die hohe Temperatur, hier also die Vorlauftemperatur, bis zu der die Wärmepumpe das Heizwasser erwärmen muss. T_n ist die niedrige Temperatur, also die Temperatur des Reservoirs an Umweltwärme, dem die Wärmepumpe Wärme entzieht.

Tabelle 3: Leistungszahl einer Wärmepumpe in Abhängigkeit vom Temperaturhub

		COP theoretisch	Wärmequellen-Temperatur in °C					
			-15	-10	-5	0	5	10
zu erzielende Vorlauftemperatur in °C	25	3,0	3,4	4,0	4,8	6,0	8,0	10
	30	2,7	3,0	3,5	4,0	4,9	6,1	8,1
	35	2,5	2,7	3,1	3,5	4,1	4,9	6,2
	40	2,3	2,5	2,8	3,1	3,6	4,2	5,0
	45	2,1	2,3	2,5	2,8	3,2	3,6	4,2
	50	2,0	2,2	2,4	2,6	2,9	3,2	3,7
	55	1,9	2,0	2,2	2,4	2,6	2,9	3,3

Quelle: eigene Berechnung

Die theoretische Leistungszahl der Wärmepumpe liegt bei diesen Annahmen zwischen 1,9, wenn auf Basis einer Temperatur der Wärmequelle von -15 °C eine Vorlauftemperatur von 55 °C erzeugt werden soll, und bei einem (praktisch kaum zu überschreitenden) Maximalwert von 10, wenn die Temperatur von einer Quellentemperatur von 15 °C nur auf 30 °C als Vorlauf für eine Flächenheizung angehoben werden soll⁷. Die Leistungszahl wirkt sich daher in erheblichem Ausmaß auf die Spreizung der variablen Stromkosten für die Wärmepumpe aus. Je höher die Leistungszahl, desto mehr Wärme wird mit jeder Kilowattstunde Strom erzeugt und desto niedriger sind die Stromkosten pro Kilowattstunde Wärme. In der zweiten Tabelle wird zur Errechnung der Stromkosten für den Betrieb der Wärmepumpe der gegenwärtig häufige Wärmepumpen-Strompreis von 22 Cent/kWh zugrunde gelegt.

Tabelle 4: Wärmekosten einer Wärmepumpe in Abhängigkeit vom Temperaturhub bei 22 Cent/kWh

		Theoretische Wärmekosten in Cent/kWh	Wärmequellen-Temperatur in °C					
			-15	-10	-5	0	5	10
zu erzielende Vorlauftemperatur in °C	25	7,4	6,5	5,5	4,6	3,7	2,8	1,8
	30	8,2	7,3	6,3	5,4	4,5	3,6	2,7
	35	8,9	8,0	7,1	6,2	5,4	4,5	3,6
	40	9,7	8,8	7,9	7,0	6,1	5,3	4,4
	45	10,4	9,5	8,6	7,8	6,9	6,1	5,2
	50	11,1	10,2	9,4	8,5	7,7	6,8	6,0
	55	11,7	10,9	10,1	9,2	8,4	7,5	6,7

Quelle: eigene Berechnung

⁷ Praktisch sinkt der zeta_WP Wert bei niedrigem Temperaturhub stark ab, so dass die sehr hohen COPs von theoretisch über 10 real kaum erreicht werden können. Dies dürfte hier aber nur von geringer Bedeutung sein.

So kann mit einer Luftwärmepumpe noch bei einer Außentemperatur von 5°C zu Stromkosten von ca. 5 Cent/kWh Wärme für den Vorlauf einer Flächenheizung bereitgestellt werden. Soll dagegen der Vorlauf auf 55°C erwärmt werden, um dann über Konvektorheizkörper verteilt zu werden, betragen die (theoretischen) Stromkosten zum Betrieb der Wärmepumpe schon über 8 Cent/kWh. Die Erschließung einer möglichst warmen Wärmequelle auf der einen Seite und der Bau einer Wärmeverteilung, die mit einer möglichst niedrigen Vorlauftemperatur auskommt, auf der anderen Seite bestimmt daher die Ausgangsposition für einen langfristig möglichst preisgünstigen Betrieb der Anlage.

Je höher die Temperatur der Wärmequelle und je niedriger der nötige Temperaturhub, desto höher die Leistungszahl und desto niedriger die Stromkosten für den Betrieb der Wärmepumpe.

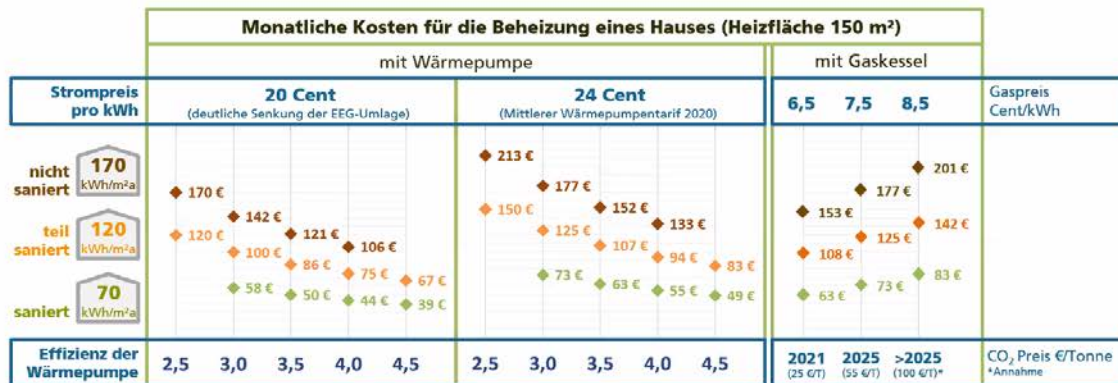
3.2 Die Auswirkung von Strom- und CO₂-Preis auf den Preis der Wärme

Der geplante komplette Wegfall der EEG-Umlage auf den Strompreis im Rahmen der von der Ampelkoalition geplanten konsequenten Klimapolitik zum 1.1.2023 (SPD et al., 2021) wird den Wärmepumpen-Strompreis noch weiter absinken lassen. Dabei wird aber die Reduktion nicht in Höhe der vollen EEG-Umlage aus 2020 von über 6 Cent/kWh eintreten, da einige Komponenten der EEG-Umlage vom in letzter Zeit stark gestiegenen Börsenstrompreis abhängig sind.

Wenn es im Koalitionsvertrag also heißt „Im Zuge des Ausbaus der Erneuerbaren Energien werden wir ein neues Strommarktdesign erarbeiten“ (SPD et al., 2021, S. 61), dann werden viele Faktoren des Strompreises unter die Lupe genommen werden. Da ein neues Strommarktdesign aber für große Gruppen von Industrie und Konsumgesellschaft wesentliche Auswirkungen haben wird, ist ein konkretes Ergebnis der Verhandlungen über ein solches Design kaum vorherzusehen. Das Einzige, was einigermaßen sicher angenommen werden kann ist, dass Wärmepumpenstrom sich verbilligen wird (SPD et al., 2021, S. 62). Durch ein gleichzeitig erwartetes Ansteigen der Preise für fossile Brennstoffe könnte dabei die relative Wettbewerbsfähigkeit von Wärmepumpen im Vergleich zu Heizöl und Erdgas noch weiter zunehmen. Der bisherige Preispfad des Brennstoffemissionshandelsgesetzes (BEHG) wird dabei auch von der Ampelkoalition aus „sozialen Gründen“ zunächst beibehalten werden, da die Brennstoffpreise sich kurzfristig zum Zeitpunkt der Verhandlungen um den Koalitionsvertrag auf einem hohen Niveau befunden haben. Dieser Preispfad lässt den Preis 2022 auf 30 €/TonneCO₂, 2023 auf 35 €/TonneCO₂, 2024 auf 45 €/TonneCO₂ und 2025 auf 55 €/TonneCO₂ steigen. Da aber der europäische Preis für Emissionshandelszertifikate für große Anlagen (EU-ETS) sich seit Mitte 2021 um die 60 €/TonneCO₂ eingependelt hatte und Anfang Dezember auf knapp 85 €/TonneCO₂ gestiegen ist, dürfte mittelfristig auch bei Brennstoffen mit einem erhöhten CO₂-Preis zu rechnen sein, auch wenn diese CO₂-Handelssysteme bisher nicht direkt gekoppelt sind.

Unter einer Vielzahl von Annahmen hat Miara (2021b) einen Vergleich der monatlichen Heizkosten für ein Einfamilienhaus von 150 m² versucht. Verglichen werden die Heizkosten für unsanierte, teilsanierte und sanierte Gebäude von Wärmepumpenheizungen und Erdgasheizung (siehe Abbildung 6).

Abbildung 6: Monatliche Betriebskosten



Quelle: Miara (2021b)

Es zeigt sich, dass schon 2025 bei einem CO₂-Preis von 55 €/TonneCO₂ eine Wärmepumpe mit einer Leistungszahl von 3,0 selbst bei einem Strompreis von 24 Cent/kWh preislich mithalten können. Jede darüber hinaus gehende Erhöhung des CO₂-Preises und jede Senkung des Strompreises würden einen Kostenvorteil der Wärmepumpe noch deutlicher machen.

Ein wesentliches Problem für die Wirksamkeit der zu erwartenden Preisveränderungen auf den Wärmemarkt liegt aber darin, dass die Politik keine verbindlichen Preise oder zumindest verbindliche Mindestpreise ab 2026 festlegt. Die fünf Jahre bis dahin mögen für die Politik eine lange Frist sein, für die Entscheidung für ein Heizsystem für die nächsten Jahrzehnte sind sie es nicht. Die Forschungsstelle für Energiewirtschaft (2021, S. 4) stellt hierzu fest:

» Die derzeitige gesetzliche Regelung zur Emissionsbepreisung erzielt... keine ausreichende Lenkungswirkung im Wärmemarkt, solange die Entwicklung des CO₂-Preises für Verbraucher für die Zeit ab dem Jahr 2027 nicht kalkulierbar ist. Aufgrund der langen Transformationszyklen im Wärmemarkt ist ein Abwarten jedoch nicht zielführend. Eine mögliche Weichenstellung für den verstärkten Einsatz von Wärmepumpen ist daher die Befreiung des Wärmepumpenstromtarifs von der EEG-Umlage. Dies schafft auch im Falle einer moderaten Erhöhung des CO₂-Preises die für den Technologiewechsel zu Wärmepumpe notwendigen finanziellen Anreize sowie Planungssicherheit für Verbraucher. Ohne Reduktion des Wärmepumpentarifs wird eine Transformation erst durch einen sehr hohen CO₂-Preis angereizt, der die Kosten für das Heizen deutlich erhöht. «

Auch das Wegfallen der EEG-Umlage könnte sich als zu schwaches Instrument erweisen, wenn von den 6 Cent/kWh, die die EEG-Umlage in den letzten Jahren ausmachte, nur 3 Cent/kWh letztlich wegfallen und die anderen 3 Cent/kWh in Form eines höheren Börsenstrompreises doch wieder auf der Rechnung stehen. In diesem Fall müsste das Strommarktdesign einen expliziten und hinreichend niedrigen Wärmepumpentarif ausweisen. Die Berechnungen der Forschungsstelle für Energiewirtschaft (2021, S. 20) weisen für eine CO₂-Abgabe von 65 €/Tonne CO₂ aus, dass mit den heutigen Wärmepumpentarifen zwischen 22 und 25 Cent/kWh die Wärmepumpe noch in keinem Gebäudetyp wettbewerbsfähig ist. Würde der Wärmepumpenstrom zwischen 18 und 20 Cent/kWh kosten, würde diese Wettbewerbsfähigkeit bei allen Gebäudetypen für die Luftwärmepumpe erreicht, ein Wärmepumpentarif zwischen 16 und 17 Cent/kWh würde auch die Erdwärmepumpe in allen Gebäudetypen wettbewerbsfähig machen. Wäre die CO₂-Abgabe höher und betrüge von 100 €/Tonne CO₂, dann würde die Wettbewerbsfähigkeit beider Wärmepumpenarten schon bei einem Wärmepumpentarif von 19 bis 21 Cent/kWh erreicht.

Wenn der Strompreis in Zukunft deutlich sinkt oder fossile Brennstoffe deutlich teurer werden rechnet sich eine Wärmepumpe fast in jedem Gebäude.

3.3 Die Investitionskosten

Die Investitionskosten in eine Wärmepumpenanlage variieren objektbezogen in hohem Ausmaß. Sie sind abhängig vom Wärmebedarf des Gebäudes und damit von der notwendigen Leistung der Wärmepumpe, von der Entscheidung für eine Erd- oder Luftwärmepumpe sowie davon, ob im Gebäude eine neue Wärmeverteilung z.B. in Form einer Flächenheizung installiert wird. Das Fraunhofer ISE spricht daher bei der Analyse von Wärmepumpen in Bestandsgebäuden nur davon, die Investitionskosten seien „relativ hoch“ (Fraunhofer ISE, 2020, S. 114).

Der Bundesverband Wärmepumpe gibt für ein Einfamilienhaus mit 120 m² Wohnfläche und einem Wärmebedarf von 50 W/m², also eine Wärmeleistung von 6 kW, für die Wärmepumpe eine grobe Kostenschätzung von 9.000 € und für eine 100 m Bohrung (inkl. horizontale Anbindung) eine Kostenschätzung von 6.000 € an. Die Website Energieheld gibt für eine Wärmepumpenanlage für ein 150 m² Haus eine Spanne von 15.000 € bis 30.000 € an (Energieheld, 2021). PricewaterhouseCoopers (2020, S. 44) dokumentiert zusätzliche Investitionskosten für eine Wärmepumpenanlage im Vergleich zu einer neuen Ölheizung von 6.100 €.

Einen systematischen Vergleich führte Shell in der Hauswärmestudie (Bundesindustrieverband Deutschland Haus-, Energie- und Umwelttechnik & Shell, 2013, S. 42) durch. Für ein vollsaniertes Einfamilienhaus werden hier 13.200 € Investitionskosten für eine Luftwärmepumpenanlage und 24.000 € für eine Sole-Wasser-Wärmepumpenanlage angegeben. Für ein teilsaniertes Haus wird nur die Luftwärmepumpe zu Kosten von 16.100 € angegeben und für unsanierte Häuser erscheinen aus Sicht der Studie, also des Jahres 2012/2013, Wärmepumpen noch gänzlich ungeeignet.

Letztlich sind die Informationen über die Investitionskosten lückenhaft. Deutlich ist, dass Wärmepumpenanlagen teurer sind als Gasheizungen. Wie hoch die Kosten jeweils im Einzelfall sind, ist aber in gewissem Maße von eben diesem Einzelfall abhängig. Ebenfalls von Bedeutung sind aber Entscheidungen des Bauherrn, nämlich ob unabhängig vom Wärmeerzeuger eine Flächenheizung verbaut und ob eine Luft- oder Solewärmepumpe errichtet wird.

Durch in Zukunft deutlich niedrigere Betriebskosten (vgl. Abschnitt 3.2) werden sich langfristig aber die höheren Investitionskosten im Regelfall als rentierlich erweisen.

3.4 Fazit Wirtschaftlichkeit

Die für die Wirtschaftlichkeit wichtige Leistungszahl von Wärmepumpen ist zum einen von der Art der Wärmequelle, Erdsonde oder Außenluftwärmetauscher, und zum zweiten von der Art der Wärmeverteilung, Flächen- oder Konvektorheizung, abhängig.

Unter Berücksichtigung der Prognosen für die Entwicklung der Preise für Heizöl und Erdgas einerseits und Strom andererseits ergeben Wirtschaftlichkeitsanalysen für Standard-Einsatzfälle gegenwärtig im Regelfall einen Wirtschaftlichkeitsvorteil für die Wärmepumpe im Vergleich zu fossilen Verbrenner-Heizungen.

Mit Blick auf die langfristigen Kosten, die auf Hausbesitzende zukommen, ist aber auch die zu erwartende Lebensdauer von hoher Bedeutung für die Wirtschaftlichkeit. Ob eine Wärmepumpe nach 20, 30 oder 40 Jahren ersetzt werden muss und ob die Erdwärmesonde über 20, 50 oder 100 Jahre vergleichsweise „warme“ Wärme liefert, wird zumindest für die rückblickende Beurteilung der Wirtschaftlichkeit nach langer Zeit maßgeblich sein. Für die Erdwärmesonden, wie auch für die anderen Komponenten einer Wärmepumpenanlage, liegen aber bisher öffentlich nur ungenügende empirische Belege für lange Lebensdauer vor.

Sollte man in Zukunft nicht mehr von Öl- und Gasheizungen sprechen, sondern von Verbrenner-Heizungen? Wärmepumpen könnten dann vom niedergehenden Image des Verbrennungsmotors profitieren.

4 Diffusionsfaktoren

Die Innovationsforschung untersucht seit vielen Jahren das Zustandekommen von Innovationen und berät die Politik dabei, das Innovationsgeschehen zu beschleunigen. Aber für die Veränderung der Welt und die Transformation zu einer klimaneutralen Wirtschaft ist es von deutlich höherer Bedeutung zu erreichen, dass klimafreundliche Innovationen auch in der Gesellschaft ankommen, genutzt werden und alte, wenig klimafreundliche Lösungen verdrängen. Der Prozess der Verbreitung von Innovationen in der Gesellschaft ist ebenfalls seit Jahren Gegenstand der wissenschaftlichen Analyse und wird als Diffusionsforschung bezeichnet (Rogers, 2003).

Die Diffusionsforschung untersucht den Prozess der Verbreitung von Innovationen von der Markteinführung bis zur Verbreitung in den Massenmarkt.

Das im Folgenden genutzte System der Diffusionsanalyse wurde im Projekt „Diffusionspfade von Umweltinnovationen“ auf Basis einer breiten Literaturanalyse entwickelt (Clausen, Fichter, & Winter, 2011; Fichter & Clausen, 2013) und im Rahmen des Projektes „Umweltinnovationen und ihre Diffusion als Treiber der Green Economy“ im Auftrag des Umweltbundesamtes weiterentwickelt (Clausen & Fichter, 2019). Die Methodik zur Erstellung der Fallprofile ist, da sie nicht verändert wurde und ein abweichender Text nur Verwirrung stiften würde, einem der im Rahmen dieses Projektes erstellten Materialbände entnommen (Clausen & Steudle, 2016) und nur leicht an die fokussierte Zielsetzung der Analyse angepasst.

4.1 Erstellung von Fallprofilen der Diffusionsanalyse

Anhand von Sekundärinformationen wird auf qualitativem Wege für jeden Fall ein Profil erstellt. Die Beschreibung der Fälle im jeweiligen Profil folgt dabei einem definierten Profilschema. Dieses umfasst zentrale Eckdaten zum Innovationsgegenstand und zum Ablauf der Diffusion sowie zu den 22 Einflussfaktoren, die von Fichter und Clausen (2013, S. 97) als potenziell relevant für den Verlauf des Diffusionsprozesses herausgearbeitet wurden.

Das Profilschema hat die Funktion eines standardisierten Erhebungsinstruments (vgl. Fichter & Clausen 2013, S. 156 ff.), ähnlich einem standardisierten Beobachtungsprotokoll. Es werden nur solche Faktoren untersucht, denen in der Fachwelt oder aufgrund von Sekundärinformationen plausibel eine Wirkung unterstellt werden kann. Das Vorgehen ist also ähnlich der teilnehmenden Beobachtung.

Da „Innovationen“ nicht befragt werden können, erfolgt die Datenerhebung nicht, wie in der quantitativen Sozialforschung sonst üblich, durch Befragung der Merkmalsträger, sondern in einem erneuten qualitativen Schritt durch Codierung in einem Codierteam. Mit anderen Worten, jeder Fall wird mit einer Ausprägung für jeden Faktor versehen. Die Einflussfaktoren werden mit 3er und 5er-Skalen (0 bis +2 und -2 bis +2) erhoben. Ergebnis der Datenerhebung ist ein Datensatz, der Eckdaten aller untersuchten Fälle von Innovationen sowie Ausprägungen von 22 Variablen (die potenziellen Einflussfaktoren) enthält. Interrater-Reliabilität wird in diesem Prozess der Datenerhebung insofern hergestellt, als die Codierung in einem mehrköpfigen Team erfolgt und dadurch intersubjektiv nachvollziehbar und reproduzierbar wird. Auf diese Weise wird qualitatives **Datenmaterial** quantifiziert und einer deskriptiven statistischen Auswertung zugänglich gemacht, ohne den Anspruch zu erheben, Kausalitäten abgebildet oder Messungen vorgenommen zu haben.

4.2 Codesystem zur Erhebung der Einflussfaktoren

Die Erfassung von Informationen über Diffusions-Fallprofile sowie die Codierung der Ausprägungen der Einflussfaktoren erfolgt nach dem unten dokumentierten Schema. Dabei wird jedem Diffusionsfall genau eine Ausprägung jedes Einflussfaktors zugewiesen. Die für diese Codierung erforderlichen Informationen werden dabei aus online wie offline vorliegenden Dokumenten entnommen und die Quellen jeweils dokumentiert. Zur Gewährleistung intersubjektiver Nachvollziehbarkeit wird eine annähernde Interrater-Reliabilität durch Codierung der Fallprofile in einem mehrköpfigen Codierteam hergestellt.

Die Codierung erfolgte grundsätzlich anhand der verfügbaren Informationen über den gesamten bisherigen Diffusionsprozess, d. h. auf den Zeitraum von der Markteinführung bis heute.

Die Codierung erfolgt nach dem Prinzip der Abweichung von der Nullhypothese. Generell wird daher jedem Faktor eine Einflusswirkung von 0 unterstellt. Nur dort, wo die erhobenen empirischen Informationen unstrittig und intersubjektiv nachvollziehbar eine andere Annahme nahelegen, wird mit 1 und 2 für einen förderlichen oder sehr stark förderlichen Einfluss und mit -1 und -2 für einen hemmenden bzw. sehr stark hemmenden Einfluss codiert.

Tabelle 5: Einflussfaktoren und Codierung der Diffusionsanalyse

Produktbezogene Faktoren	Codierung
1. Relativer Vorteil der Innovation: Welchen funktionellen oder sozialen Vorteil hat die Innovation im Vergleich zum Vorgängerprodukt?	2: neue nützliche Funktion oder starker sozialer Vorteil 1: weniger wesentliche neue Funktion oder kleiner Sozialer Vorteil 0: kein relativer Vorteil erkennbar
2. Wahrnehmbarkeit: Ist die Nutzung der Innovation durch Dritte wahrnehmbar, ohne das durch besondere Informationsanstrengungen auf sie hingewiesen wird?	2: Deutlich UND in der Öffentlichkeit wahrnehmbar 1: Weniger deutlich oder nur in Innenräumen u. ä. wahrnehmbar 0 Punkte: Nicht wahrnehmbar
3. Kompatibilität: Ist die Innovation an ihr Umfeld technisch, institutionell und kulturell anschlussfähig?	0 : neutral -1: Anschlussfähigkeit erfordert Aufwand oder Lernen -2 : Anschlussfähigkeit nur schwer herzustellen
4. Komplexität: Ist die Innovation für den Adopter komplex und bedarf es besonderen Fachwissens zum Verständnis?	0: unkomplex -1: leicht komplex -2: bedarf besonderen Fachwissens
5. Erprobbarkeit: Kann die Innovation ohne großen Aufwand durch den Adopter erprobt werden?	2: Einfach und mit im Vergleich zur Wirtschaftlichkeit geringen Kosten erprobbar 1: Aufwendig erprobbar 0: Nicht erprobbar

Adoptorbezogene Faktoren	Codierung
<p>6. Nutzer-Innovatoren: Lassen sich im Innovationsprozess bzw. bei der Markteinführung Innovatoren auf der Adoptorseite identifizieren? Gibt es Hinweise, dass Nutzer-Innovatoren gezielt in den Herstellerinnovationsprozess integriert wurden?</p>	<p>2: Die Existenz einer größeren Gruppe von Innovatoren ist bekannt 1: Die Existenz einer kleinen Gruppe von Innovatoren ist bekannt 0: Nicht bekannt.</p>
<p>7. Notwendigkeit von Verhaltensänderung: Verlangt die Anwendung der Innovation beim Adoptor eine Verhaltensänderung?</p>	<p>0: keine Verhaltensänderung erforderlich -1: Verhaltensänderung erforderlich -2: deutliche Verhaltensänderung erforderlich</p>
<p>8. Unsicherheiten bei Adoptoren: Inwieweit gab oder gibt es unter den Adoptoren Unsicherheiten bezüglich der Innovation?</p>	<p>0: keine Unsicherheiten bekannt -1: kleine Unsicherheiten -2: deutliche Unsicherheiten</p>
<p>9. Preise, Kosten, Wirtschaftlichkeit: Inwieweit fördern oder hemmen Preis-, Kosten- oder Wirtschaftlichkeitsaspekte die Adoption?</p>	<p>2: hohe Wirtschaftlichkeit oder billiger 1: leicht wirtschaftlich oder etwas billiger 0: neutral -1: leicht unwirtschaftlich oder etwas teurer -2: deutlich unwirtschaftlich oder deutlich teurer</p>

Anbieterbezogene Faktoren	Codierung
<p>10. Ausbildungsaufwand Erfordert die Erbringung der Dienstleistung hohen Aufwand zur Ausbildung und im Qualitätsmanagement?</p>	<p>0: neutral -1: hoher Ausbildungs- und QM-Aufwand wirken leicht hemmend -2: hoher Ausbildungs- und QM-Aufwand wirken deutlich hemmend</p>
<p>11. Bekanntheitsgrad und Reputation der Anbieter: Existieren bereits Anbieter der Innovation, die über einen hohen Bekanntheitsgrad und hohe Reputation verfügen?</p>	<p>2: Bekannte Unternehmen mit hoher Reputation bieten die Innovation an 1: weniger bekannte Unternehmen bieten die Innovation an 0: nur unbekannte Anbieter</p>
<p>12. Vollständigkeit und Verfügbarkeit der Serviceangebote: Wird die Innovation mit einem vollständigen Servicepaket angeboten und ist sie für den Kundenkreis einfach verfügbar?</p>	<p>2: Verfügbarkeit und Service sind überall sichergestellt 1: kleine Einschränkungen in Verfügbarkeit oder Service 0: neutral -1: schlechte Verfügbarkeit oder fehlender Service wirken leicht hemmend -2: schlechte Verfügbarkeit oder fehlender Service wirken deutlich hemmend</p>

Branchenbezogene Faktoren	Codierung
<p>13. Rolle des Branchenverbandes: Existiert ein Branchenverband, verfügt er über politischen Einfluss und setzt er diesen für die Förderung der Innovation ein?</p>	<p>2: starke und aktive Unterstützung 1: weniger starke oder weniger aktive Unterstützung 0: kein Branchenverband bzw. keine Aktivität -1: leicht hemmender Einfluss -2: deutlich hemmender Einfluss</p>
<p>14. Rolle der Marktführer: Wer waren die Marktführer in der Branche, in dem die Innovation eingeführt wurde und fördern oder hemmen sie die Diffusion?</p>	<p>2: Marktführer haben die Innovation von Anfang an mit eingeführt 1: Marktführer haben die Innovation leicht gefördert 0: Marktführer verhielten sich neutral -1: Marktführer haben die Diffusion leicht behindert -2: Marktführer haben engagiert gegen die Diffusion gekämpft</p>
<p>15. Intermediäre als Change Agencies: Inwieweit haben Marktintermediäre (z.B. Handelsunternehmen) und Politikintermediäre (z.B. Energie-, Effizienz-, Klimaschutzagenturen) bis dato den Diffusionsverlauf beschleunigt oder gebremst?</p>	<p>2: viele Intermediäre haben die Diffusion engagiert gefördert 1: einige Intermediäre haben sich für die Diffusion eingesetzt 0: keine aktiven Intermediäre bekannt -1: einige Intermediäre bremsen die Diffusion -2: viele Intermediäre bremsen die Diffusion</p>
Politische Faktoren	Codierung
<p>16. Institutionelle Hemmnisse: Inwieweit haben gesetzliche oder behördliche Regelungen die Verbreitung der Innovation bis dato gehemmt?</p>	<p>0: keine Hemmnisse -1: kleine Hemmnisse -2: deutliche Hemmnisse</p>
<p>17. Staatliche Push- und Pull-Aktivitäten: Inwieweit wurde die Innovation durch regionale, nationale oder EU-weite Vorschriften (Push) oder Förderaktivitäten (Pull) in ihrer Verbreitung beschleunigt?</p>	<p>2: deutliche Förderung 1: eingeschränkte Förderung 0: keine Förderung -1: kleine Hemmnisse -2: deutliche Hemmnisse</p>
<p>18. Leitmarktpolitiken: Ist die Innovation Teil einer gezielten Leitmarktpolitik auf regionaler, nationaler oder EU-Ebene?</p>	<p>2: Eine Leitmarktpolitik ist bekannt und wird aktiv verfolgt. 1: Nebenaspekt eines Leitmarktes 0: Nicht bekannt.</p>
<p>19. Medien und Kampagnen: Inwieweit haben Medien (Presse, Rundfunk etc.) und Kampagnen von NGOs den Diffusionsverlauf beschleunigt oder gebremst?</p>	<p>2: die Innovation wurde durch die Medien deutlich gefördert 1: die Innovation wurde durch die Medien etwas gefördert 0: über die Innovation wird nur selten berichtet -1: Medienberichte etc. wirkten hemmend -2: Medienberichte etc. wirkten deutlich hemmend</p>

Pfadbezogene Faktoren	Codierung
20. Pfadabhängigkeiten: Inwieweit haben technologische oder wirtschaftliche Pfadabhängigkeiten die bisherige Diffusionsgeschwindigkeit gebremst?	2: die Innovation hat sich sehr schnell zum dominanten Design entwickelt 1: in einigen Marktsegmenten erreicht die Innovation den Status des dominanten Designs 0: neutral -1: Vorgängerprodukte haben über ein leichtes lock-in die Diffusion gebremst -2: Vorgängerprodukte haben über ein starkes lock-in die Diffusion stark verzögert
21. Preisentwicklung: Wie hat sich der (inflationsbereinigte) Preis im Verlauf des Diffusionsprozesses entwickelt?	2: Preis ist seit der Markteinführung z.B. durch economies of scale oder Folgeinnovationen stark gesunken 1: Preis ist wenig gesunken 0: Preis ist gleichgeblieben -1: Preis ist leicht gestiegen -2: Preis ist deutlich gestiegen
22. Selbstverstärkende Effekte: Sind im sozialen System des Diffusionsprozesses selbstverstärkende Effekte wie z.B. Nachahmungseffekte aufgrund von Vorbildern/ Prominenten/ Meinungsführern oder kritische Masse-Phänomene zu	2: deutliches „kritische Masse Phänomen“ 1: leichtes „kritische Masse Phänomen“ 0: keine selbstverstärkenden Effekte

4.3 Diffusionsanalyse für Wärmepumpenanlagen

Das Fallprofil der Diffusion der Wärmepumpe beruht auf der Analyse von Clausen und Steudle (2016) und wurde aktualisiert und dem neuen Stand der Entwicklung angepasst. Als Komponenten einer Wärmepumpenanlage werden hier die Wärmepumpe, die Wärmequellenanlage (Erdwärmesonde oder Luftwärmetauscher) sowie die Dienstleistung der Installation verstanden.

Da der Einsatz von Wärmepumpen in Neubau und Bestand wesentliche Unterschiede mit sich bringt, erfolgt bei einigen Faktoren eine getrennte Bewertung für die Anwendungskontexte Neubau und Bestand.

Die Diffusionsanalyse der Wärmepumpe betrachtet den Prozess der Verbreitung im Markt seit den 1970er Jahren bis in die Gegenwart.

Tabelle 6: Einflussfaktoren, Fakten und Codierung der Diffusionsanalyse für die Wärmepumpe

Produktbezogene Faktoren	Fakten	Wertung
1. Relativer Vorteil der Innovation: Welchen funktionellen oder sozialen Vorteil hat die	Neubau und Bestand: Eine moderne Wärmepumpe kann im Winter und der Übergangszeit ein Gebäude mit Wärme versorgen. Durch eine Wärmepumpe wird der Verbraucher unabhängig von Öl- und Gaspreisen sowie der steigenden CO ₂ -Abgabe, aber	Neubau 2 Bestand 1

<p>Innovation im Vergleich zum Vorgängerprodukt?</p>	<p>er wird stattdessen vom Strommarkt abhängig. Angetrieben wird die Pumpe mit Strom und meist liegt der Strombedarf bei 30% bis 35% der abgegebenen Wärmemenge. Zudem ist die Wärmepumpe mit PV oder dem Bezug von Ökostrom kombinierbar (Energieheld, 2021) und ermöglicht so schon heute einen theoretisch CO₂-freien Betrieb. Langfristig werden Heizungsanlagen mit Wärmepumpe bei weiter steigendem Regenerativstromanteil CO₂-neutral werden.</p> <p>Neubau (im Bestand sehr aufwendig): In der Kombination mit einer eigenen PV-Anlage und einer Flächenheizung ist die sommerliche Kühlung mit dem im selben Gebäude erzeugten regenerativen Strom möglich. Die sommerliche Kühlung hat in Verbindung mit einer Erdwärmesonde zudem die wichtige Funktion der Regeneration der Sonde.</p>	
<p>2. Wahrnehmbarkeit: Ist die Nutzung der Innovation durch Dritte wahrnehmbar, ohne das durch besondere Informationsanstrengungen auf sie hingewiesen wird?</p>	<p>Wärmepumpenanlagen mit Erdwärmesonde sind von außen am Haus nicht zu erkennen. Bei Luftwärmepumpen steht der Außenluftwärmetauscher zwar draußen und ist grundsätzlich sichtbar. Unklar ist aber, ob das sichtbare Gerät von vielen Menschen mit einem Heizungssystem assoziiert wird.</p> <p>Abbildung 7: Luftwärmetauscher auf der Terasse</p>  <p>Quelle: bwp</p>	<p>0</p>
<p>3. Kompatibilität: Ist die Innovation an ihr Umfeld technisch, institutionell und kulturell anschlussfähig?</p>	<p>Neubau und Bestand: Die Wärmequelle muss über eine Erdwärmesonde oder einen Luftwärmetauscher erschlossen werden. Für eine Erdwärmesonde ist ein hinreichend großes Grundstück erforderlich, auf dem eine Erdwärmebohrung genehmigt werden und das zudem mit einem Bohrergerät erreicht werden kann.</p> <p>Neubau (im Bestand sehr aufwendig): Die Technologie erfordert ein Wärmeverteilsystem mit niedriger Vorlauftemperatur und dafür eine Flächenheizung (in Fußboden oder Wänden) und ist zumindest, wenn eine sehr gute Leistungszahl angestrebt wird - nicht mit den üblichen Konvektorheizkörpern kompatibel.⁸</p>	<p>Neubau 0 Bestand -2</p>
<p>4. Komplexität: Ist die Innovation für den Adopter komplex und bedarf es besonderen Fachwissens zum Verständnis?</p>	<p>Komplexe Technik, die aber der Nutzer weder verstehen noch beherrschen muss, da sie durch Firmen gewartet wird und die Komplexität im Vergleich zu anderen Heizanlagen nicht wesentlich höher ist.</p>	<p>0</p>

⁸ Um die für Konvektoren erforderliche Vorlauftemperatur von 55°C bis 65°C zu erreichen müsste der Temperaturhub der Wärmepumpe sehr groß werden, was die Leistungszahl drückt.

WÄRMEPUNGENANLAGEN: Technologie, Wirtschaftlichkeit, Diffusionsfaktoren

<p>5. Erprobbarkeit: Kann die Innovation ohne großen Aufwand durch den Adopter erprobt werden?</p>	<p>Nicht erprobbar, weswegen die gute Dokumentation von guten Beispielen besondere Bedeutung zukommt. .</p>	<p>0</p>
<p>Adoptorbegogene Faktoren</p>	<p>Fakten</p>	<p>Wertung</p>
<p>6. Nutzer-Innovatoren: Lassen sich im Innovationsprozess bzw. bei der Markteinführung Innovatoren auf der Adoptorseite identifizieren? Gibt es Hinweise, dass Nutzer-Innovatoren gezielt in den Herstellerinnovationsprozess integriert wurden?</p>	<p>Bei den Nutzenden von Wärmepumpen scheint es sich um grundsätzlich typische Vertreter des ökologischen Konsums zu handeln, wie sie z.B. als Postmaterielle von Kleinhüchelkotten beschrieben wurde (Kleinhüchelkotten, 2006; Kleinhüchelkotten, Neitzke, & Moser, 2016). Die Befragung der Verbraucherzentrale Rheinland-Pfalz zeigt, dass Umweltbewusstsein und Klimaschutz genau wie die Wirtschaftlichkeit für jeweils etwas über 70 % der Nutzenden die entscheidenden Gründe für die Wärmepumpe waren (Verbraucherzentrale Rheinland-Pfalz, 2019, S. 26). Die hohe Bedeutung der eigeninitiativen Einholung von Informationen über das Internet weist auf einen hohen Bildungsstand hin (Verbraucherzentrale Rheinland-Pfalz, 2019, S. 25). Das Einkommen der Wärmepumpen-Nutzenden liegt zudem leicht über dem Durchschnitt (Verbraucherzentrale Rheinland-Pfalz, 2019, S. 8). In Anlehnung an Gellrich (2016, S. 243) kann daher auf eine gewisse Bedeutung einer ökologisch orientierten postmateriellen Konsumentengruppe geschlossen werden.</p>	<p>1</p>
<p>7. Notwendigkeit von Verhaltensänderung: Verlangt die Anwendung der Innovation beim Adopter eine Verhaltensänderung?</p>	<p>Eine Verhaltensänderung ist nur in Bezug auf einen bewussten Auswahlprozess notwendig und scheint auch stattzufinden (Verbraucherzentrale Rheinland-Pfalz, 2019). Die kontinuierliche Nutzung der Wärmepumpenheizung ist ähnlich wie die Nutzung anderer Heizungsanlagen nicht mit einem bewusst geänderten Verhalten verbunden. Die Verbraucherzentrale Rheinland-Pfalz schreibt hierzu: „Es ist zu vermuten, dass für viele der Befragten die Wärmepumpe eine Art Blackbox ist. Ihnen ist nicht wirklich klar, ob es überhaupt bestimmte Anforderungen gibt und welche Bedingungen gut sind. Besonderes Interesse sich vertiefend mit der Funktionsweise der Wärmepumpe zu beschäftigen besteht nicht“ (Verbraucherzentrale Rheinland-Pfalz, 2019, S. 38).</p>	<p>0</p>
<p>8. Unsicherheiten bei Adoptoren: Inwieweit gab oder gibt es unter den Adoptoren Unsicherheiten bezüglich der Innovation?</p>	<p>Neubau: Im Anschluss an den Marktkollaps durch Qualitätsprobleme 1982 hielten sich bis Mitte der 90er Unsicherheitsgefühle in Bezug auf die Produktqualität (Quaschnig, 2006). Heute sind diese Unsicherheiten zumindest bei der Anwendung im Neubau kaum noch wirksam, was sich z.B. in einer Marktdurchdringung von Wärmepumpen im Neubau von bis zu 63 % zeigt (vgl. Abbildung 2).</p> <p>Bestand: Im Bestand dagegen gelten Wärmepumpen vielfach als ungeeignet und sowohl die Hausbesitzenden wie die Installateure haben Vorbehalte (M-Tec Energie Innovativ, 2021). Forschungsprojekt wie das Projekt Wärmepumpen in Bestandsgebäuden (Fraunhofer ISE, 2020) sollen diesem Mythos entgegenwirken.</p>	<p>Neubau: 0 Bestand: -2</p>

<p>9. Preise, Kosten, Wirtschaftlichkeit: Inwiefern fördern oder hemmen Preis-, Kosten- oder Wirtschaftlichkeitsaspekte die Adoption?</p>	<p>Neubau und Bestand: Die Investitionskosten für eine Wärmepumpe sind mit ca. 15.000 bis 30.000 Euro je nach Art der Pumpe relativ hoch (Energieheld, 2021). Mit Blick auf die zu erwartenden Veränderungen der Preise für Strom, Heizöl und Erdgas ist über die lange Nutzungszeit einer Wärmepumpenheizung dennoch Wirtschaftlichkeit zu erwarten (vgl. Kapitel 3).</p> <p>Bestand: Ist bei Installation in einem Bestandsgebäude der nachträgliche Einbau einer Wärmepumpe mit einer Umrüstung von Konvektorheizkörpern auf eine Flächenheizung verbunden, sind die Kosten für den Einbau einer Wärmepumpe besonders hoch.</p>	<p>Neubau: 2 Bestand: 1</p>
---	--	---------------------------------

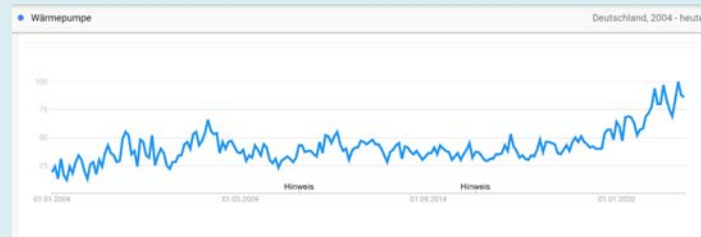
Anbieterbezogene Faktoren	Fakten	Wertung
<p>10. Ausbildungsaufwand: Erfordert die Erbringung der Dienstleistung hohen Aufwand zur Ausbildung und im Qualitätsmanagement?</p>	<p>Ausgebildete Monteure (z.B. Heizung oder Klima) bauen die Wärmepumpen ein. Zusätzlich muss die Bohrung von einem Fachbetrieb vorgenommen werden. Der Bundesverband Wärmepumpe (BWP) e.V. bietet zudem eine spezielle Ausbildung zum „EU Zertifizierten Wärmepumpeninstallateur“ an (TWK - Test- und Weiterbildungszentrum Wärmepumpen und Kältetechnik GmbH, 2021). Die Erbringung der Dienstleistung erfordert einen hohen Ausbildungsaufwand. Gut ausgebildete Monteure sind zudem gegenwärtig und ebenso auf absehbare Zeit knapp und eine Erhöhung der Kapazitäten des Handwerks scheint geboten (Bundesverband Wärmepumpe e.V. (bwp), 2021).</p>	<p>-2</p>
<p>11. Bekanntheitsgrad und Reputation der Anbieter: Existieren bereits Anbieter der Innovation, die über einen hohen Bekanntheitsgrad und hohe Reputation verfügen?</p>	<p>Wärmepumpen wurden bis Mitte der 90er eher von grünen Nischenpionieren entwickelt und angeboten. Diese hielten an der Technik auch nach Rückschlägen Anfang der 80er fest (Fichter & Clausen, 2013, S. 265). Heute wird in Testergebnissen der Stiftung Warentest deutlich, dass die Wärmepumpe bei allen großen und bekannten Thermotechnikunternehmen im Angebot ist (beste-waermepumpe.de, 2021).</p>	<p>2</p>
<p>12. Vollständigkeit und Verfügbarkeit der Serviceangebote: Wird die Innovation mit einem vollständigen Servicepaket angeboten und ist sie für den Kundenkreis einfach verfügbar?</p>	<p>Neubau: Hersteller, Großhandel und Installateure sind flächendeckend vorhanden. Für energieeffiziente Neubauten und insbesondere Passivhäuser ist es möglich, einen Installateur zu finden. Aber immer noch scheint nicht alle Handwerker mit der Wärmepumpe Erfahrungen zu haben. Auf dem Portal der Handwerkskammer Hannover erbringt die Handwerkersuche nach „Heizung“ über 1.200 Hits, die nach Wärmepumpe nur 45 (HWK-Hannover, 2022). Das Gütesiegel „Fachbetrieb Wärmepumpe“ des Bundesverbandes Wärmepumpe e.V. tragen gegenwärtig bundesweit nur ganze 44 Handwerksbetriebe (Bundesverband Wärmepumpe e.V., 2022b).</p> <p>Bestand: Viele Installateure haben begrenzte Kenntnisse in der Auslegung und Installation von Wärmepumpenanlagen für Bestandsgebäude (energiate messenger, 2021). Für weniger konventionelle Anlagen in Bestandsgebäuden ist es daher schwieriger einen Installateur zu finden. Die sehr unterschiedliche Verbreitung von Wärmepumpen in den Bundesländern (vgl. Abbildung 2) weist zudem auf erhebliche regionale Unterschiede in</p>	<p>Neubau: 1 Bestand: -2</p>

der Zahl erfahrener Installateure hin. Insgesamt erscheinen mit der Zielgruppe der Installateure gezielte Informationskampagnen notwendig zu sein (Pricewaterhouse Coopers, 2020, S. 53).

Branchenbezogene Faktoren	Fakten	Wertung
<p>13. Rolle des Branchenverbandes: Existiert ein Branchenverband, verfügt er über politischen Einfluss und setzt er diesen für die Förderung der Innovation ein?</p>	<p>Der BWP und der Bundesverband Geothermie e.V. setzen sich beide intensiv für die Belange der Branche ein, auf politischer, gesellschaftlicher, technischer und wissenschaftlicher Ebene. Sie unterstützen zudem bei der Öffentlichkeitsarbeit und dienen als Netzwerkplattform entlang der Lieferkette (Bundesverband Geothermie e.V., 2021; Bundesverband Wärmepumpe e.V., 2021b). Seit dem Beschluss des Klimaschutzgesetzes 2019 beginnt auch der vorher stark für Erdgas- und Heizöl eintretende Bundesverband der Deutschen Heizungsindustrie (BDH) seine Position auf stärker erneuerbare Energien auszurichten (Bundesverband der Deutschen Heizungsindustrie (BDH), 2021b).</p>	<p>2</p>
<p>14. Rolle der Marktführer: Wer waren die Marktführer in der Branche, in dem die Innovation eingeführt wurde und fördern oder hemmen sie die Diffusion?</p>	<p>Die (heutigen deutschen) Marktführer der Thermotechnik wie Vaillant, Viessmann oder Bosch-Junkers haben den Wärmepumpenmarkt - nach einem kurzen Intermezzo Anfang der 1980er Jahre - bis ca. 1995 vernachlässigt und scheinen nach ihrem Wiedereinstieg heute Marktführer in Deutschland zu sein. International sind sie aufgrund der kleinen Absatzzahlen in Deutschland abgeschlagen (Thomasnet.com, 2021). Seit absehbar ist, dass die Nutzung fossiler Energien ihrem Ende entgegen geht, treten die Marktführer stärker für die Wärmepumpe ein.</p>	<p>2</p>
<p>15. Intermediäre als Change Agencies: Inwieweit haben Marktintermediäre (z.B. Handelsunternehmen) und Politikintermediäre (z.B. Energie-, Effizienz-, Klimaschutzagenturen mit den teilweise von ihnen beauftragten Energieberatern) bis dato den Diffusionsverlauf beschleunigt oder gebremst?</p>	<p>Neubau: Aufgrund der Komplexität des Themas wird zwar viel zur Wärmepumpe beraten, der Schwerpunkt vieler Aktivitäten liegt aber immer noch auf dem Neubau. Die Beratungsaktivitäten der Energiesparagenturen allein haben es aber zumindest in Norddeutschland nicht einmal geschafft, der Wärmepumpe im Neubau zur Marktdominanz zu verhelfen.</p> <p>Mittlerweile fungieren auch einige Online-Informationssseiten als Vermittler für Anbieter von Wärmepumpen (Effizienzhaus Online, 2021; Energieheld, 2021).</p> <p>Bestand: Nimmt man die Entwicklung des Wärmepumpenabsatzes bei der Renovierung von Bestandsgebäuden als Erfolgskennzahl, dann sind die Beratungsagenturen erst dabei, das Thema zu erkennen. Von vier in Niedersachsen in Entwicklung befindlichen Wärmepumpenquartieren ist z.B. nur eins (in Celle) ein Quartier bestehender Gebäude (KEAN, 2021).</p>	<p>Neubau: 2 Bestand: 1</p>
Politische Faktoren	Fakten	Wertung
<p>16. Institutionelle Hemmnisse: Inwieweit haben gesetzliche oder</p>	<p>Für Erdwärmebohrungen gelten länderspezifische Vorschriften. Bohrungen sind genehmigungspflichtig (nach Wasserhaushaltsgesetz, ggf. bei einer Tiefe von über 100 m auch nach dem Bundesbergbaugesetz und weitere) und man muss einige Zeit für</p>	<p>-1</p>

<p>behördliche Regelungen die Verbreitung der Innovation bis dato gehemmt?</p>	<p>eine Genehmigung einplanen (Effizienzhaus Online, 2021). In einigen Bundesländern gibt es Vorschriften zu Mindestabständen zur Grundstücksgrenze. In Niedersachsen darf z.B. in einem Abstand von unter 5 m nur dann eine Sonde installiert werden, wenn der Eigentümer des Nachbargrundstücks zustimmt. Sowohl bei der Beratung durch Installateure vor Ort wie auch in der Presse (Asendorpf, 2021) wird dies aber so dargestellt, als sei das Bohren in einem Abstand von unter 5 m von der Grundstücksgrenze grundsätzlich untersagt. Es lässt sich resümieren, dass die Vorschriften bei aller Notwendigkeit nicht nur komplex sind, sondern auch schlecht bzw. wenig erfolgreich kommuniziert werden. Bei Berechnungen des Primärenergiebedarfs und der Emissionen eines Gebäudes entsprechend der Vorgaben des Gebäudeenergiegesetzes wird ein Strommix aus der Vergangenheit (Primärenergiefaktor 1,8; Emissionsfaktor 560 g/kWh) zugrunde gelegt, obwohl heute bereits feststeht, dass sich der Strommix bereits verbessert hat und sich über die Nutzungszeit einer Wärmepumpe weiter deutlich verbessern wird (im Gegensatz zu Öl-/Gasbasierten Heizsystemen). Dadurch werden Wärmepumpen gegenüber Öl-/Gasheizungen wesentlich schlechter dargestellt.</p>	
<p>17. Staatliche Push- und Pull-Aktivitäten: Inwieweit wurde die Innovation durch regionale, nationale oder EU-weite Vorschriften (Push) oder Förderaktivitäten (Pull) in ihrer Verbreitung beschleunigt?</p>	<p>Die Installation von Wärmepumpen wird in hohem Ausmaß vom Staat gefördert (Bundesverband Wärmepumpe e.V., 2021a). Weitere Anreize gibt der steigende Preispfad des Brennstoffemissionshandelsgesetzes sowie der u.U. sinkende Preis für Strom (vgl. Kapitel 3.2). Es gab bis vor einigen Jahren einen Blauen Engel für energiesparende Wärmepumpen auf den die Website des Umweltbundesamtes auch Ende 2021 noch hinweist (Umweltbundesamt, 2021), bis 2016 wurde aber kein Produkt danach zertifiziert (Clausen & Steudle, 2016). Heute ist auf der Website des Blauen Engels kein Hinweis auf ein solches Label für Wärmepumpen mehr zu finden (Blauer Engel, 2021).</p>	<p>2</p>
<p>18. Leitmarktpolitiken: Ist die Innovation Teil einer gezielten Leitmarktpolitik auf regionaler, nationaler oder EU-Ebene?</p>	<p>Das BMWi sieht im Bereich Energie und Umwelt einen sehr breit angelegten Leitmarkt, zu dem auch die Geothermie gerechnet wird (Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz, 2021). Praktisch wirksam erscheint eine Leitmarktpolitik im Bereich Wärme aber noch nicht.</p>	<p>1</p>
<p>19. Medien und Kampagnen: Inwieweit haben Medien (Presse, Rundfunk etc.) und Kampagnen von NGOs den Diffusionsverlauf beschleunigt oder gebremst?</p>	<p>In den Medien sind in letzter Zeit mehr Artikel zu Wärmepumpen vorhanden (z.B. Asendorpf (2021)). Ebenso berichten Branchenmagazine immer wieder über die neusten Entwicklungen. Zahlenmäßig sichtbar wird dies bei Google Trends bei der Zahl der Suchen nach dem Wort „Wärmepumpe“</p>	<p>2</p>

Abbildung 8: Google Trend Analyse „Wärmepumpe“



Quelle: Google Trend Suche nach „Wärmepumpe“ von 2004 bis 2021 am 11.12.2021

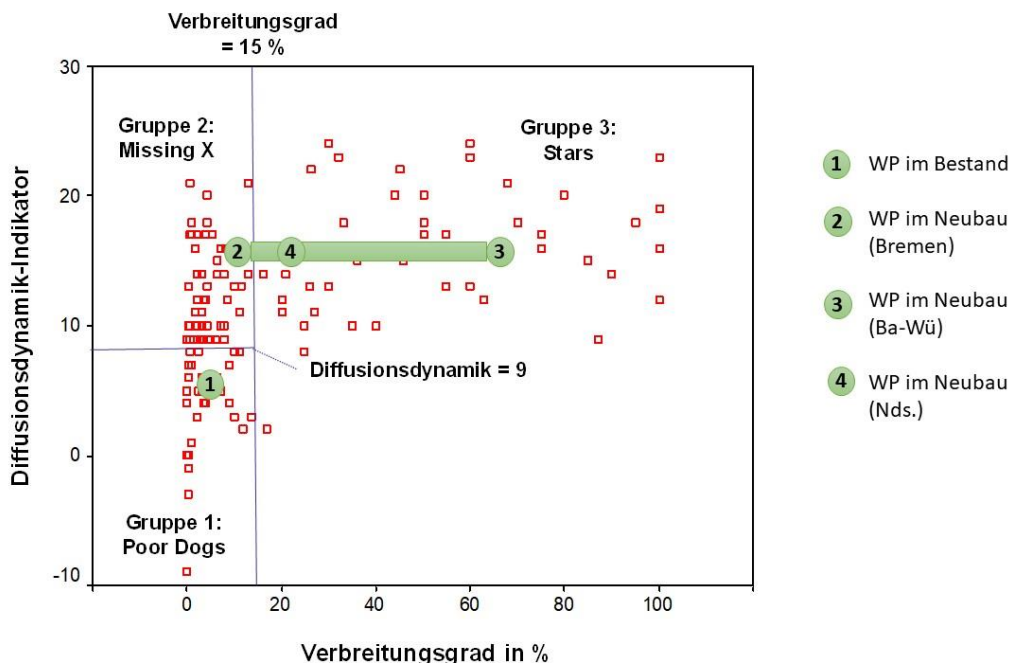
Pfadbezogene Faktoren	Fakten	Wertung
<p>20. Pfadabhängigkeiten: Inwieweit haben technologische oder wirtschaftliche Pfadabhängigkeiten die bisherige Diffusionsgeschwindigkeit gebremst?</p>	<p>Neubau und Bestand: Sowohl die Konsumierenden wie auch das Handwerk scheinen überzeugt zu sein, dass es nur da warm wird, wo es brennt (Clausen & Fichter, 2021). Die Vorstellung, dass auch „lauwarme Wärme“ zur Erwärmung von Wohnfläche geeignet ist, widerspricht vielen Vorstellungen und wird mühevoll geändert werden müssen. Rechtlich stellt ein kompliziertes und schlecht kommuniziertes Genehmigungsrecht für Erdwärmesonden eine Pfadabhängigkeit dar.</p> <p>Bestand: Technologisch sind die in vielen Gebäuden fehlenden Flächenheizungen eine Pfadabhängigkeit, die die Wirtschaftlichkeit des Betriebs von Wärmepumpen einschränken.</p>	<p>Neubau: -1 Bestand: -2</p>
<p>21. Preisentwicklung: Wie hat sich der (inflationsbereinigte) Preis im Verlauf des Diffusionsprozesses entwickelt?</p>	<p>Anfangs wurden durchweg hohe Preise verlangt, die ökonomisch nicht überzeugen konnten (Der Spiegel, 1980). Seit Anfang der 2000er Jahre ist die Wärmepumpe im Neubau offensichtlich wettbewerbsfähiger, da die Absatzzahlen steigen. Die jeweilige Preiserwartung für Gas und Öl hat dabei immer eine Rolle gespielt, wobei trotz aller Warnungen für hohe Preise fossiler Energien diese letztlich bis in die Gegenwart hinein extrem preiswert waren und noch sind. Durch die verschiedenen Förderungen ist immerhin eine höhere Wirtschaftlichkeit gegeben</p>	<p>1</p>
<p>22. Selbstverstärkende Effekte: Sind im sozialen System des Diffusionsprozesses selbstverstärkende Effekte wie z.B. Nachahmungseffekte aufgrund von Vorbildern/ Prominenten/ Meinungsführern oder kritische Masse-Phänomene zu beobachten?</p>	<p>Neubau: Im Neubau setzen langsam selbstverstärkende Effekte ein. So werden zunehmend Neubaugebiete geplant, in denen kein Gasnetz mehr verlegt wird, was viele Hauseigentümer quasi zur Nutzung einer Wärmepumpe zwingt.</p> <p>Bestand: Im Bestand fehlen solche Dynamiken noch.</p>	<p>Neubau: 1 Bestand: 0</p>

5 Diffusionsförderung

Der Marktanteil der Wärmepumpe in Deutschland wird durch die Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen dokumentiert (AGEB, 2021, S. 12f). Im Neubau wurden 2020 im Bundesmittel 43,9 % Marktanteil erreicht, der allerdings zwischen 13 % in Bremen und 63,3 % in Baden-Württemberg schwankt (vgl. Abbildung 2). Niedersachsen liegt mit 22,6 % auf dem drittletzten Platz. Im Gebäudebestand (inkl. der Neubauten der letzten Jahre) machen Wärmepumpen nur einen kleineren Anteil der Heizungs-systeme aus. Bei insgesamt 842.000 im Jahr 2020 verkauften Heizungen (Bundesverband der Deutschen Heizungsindustrie (BDH), 2021a), davon ca. 150.000 Neubauten, wurden nach Angabe des BWP ca. 30.000 Wärmepumpen im Programm Ölheizungstausch gefördert. Dies weist darauf hin, dass der Marktanteil von Wärmepumpen bei der Heizungserneuerung in Bestandsgebäuden in einer Größenordnung von 5 % bis 7 % liegen dürfte.

Die Diffusionsanalyse ergibt einen Diffusionsdynamik-Indikator von 5 für Wärmepumpen in Bestandsgebäuden und von 16 von Wärmepumpen in Neubauten.

Abbildung 9: Streudiagramm Diffusionsdynamik und Verbreitungsgrad für Wärmepumpen im Vergleich zu 130 umweltentlastenden Produkten und Dienstleistungen



Quelle: nach Clausen und Fichter (2019), n= 130

Während es die Wärmepumpe im Neubau je nach Bundesland teilweise in den Bereich der „Stars“ schafft (Clausen & Fichter, 2019), in Bremen aber noch Ladenhüter ist („Missing X“), verharrt die Wärmepumpe als Lösung für Bestandsgebäude im Keller der „Poor Dogs“ und reiht sich ein in eine Gruppe von Produkten mit äußerst kleinen Diffusionschancen. Es ist von daher notwendig, die zentralen Diffusionshemmnisse im Detail zu betrachten.

Hierzu sind zunächst einige Zusammenhänge der Diffusion von Umweltinnovationen zu erläutern. So konnten Clausen und Fichter (2019) zeigen, dass für das Voranschreiten aus der Gruppe „Poor Dogs“

in die Gruppe „Missing X“ die Entwicklung der Angebote und Marktstrukturen von zentraler Bedeutung ist. Diesem Zusammenhang ist eine Reihe von Faktoren zuzuordnen. Neben dem

- ▶ Faktor „Wahrnehmbarkeit der Innovation“ (also der Frage, ob die Wärmepumpe im öffentlichen Raum gesehen werden kann, was nicht gegeben ist, vgl. Faktor 2 in Tabelle 6) sind dies
- ▶ die Anbieter bezogenen Faktoren, also der für die Branche erforderliche „Ausbildungsaufwand“, der „Bekanntheitsgrad und die Reputation der Anbieter“, die „Vollständigkeit und Verfügbarkeit der Serviceangebote“,
- ▶ die Branchen bezogenen Faktoren „Rolle des Branchenverbandes“, die „Rolle der Marktführer“,
- ▶ die Rolle der „Intermediäre als Change Agencies“ sowie letztlich
- ▶ die „Berichterstattung durch Medien und Kampagnen“.

Jeweils unterschiedliche Kommunikationsmaßnahmen müssen sich auf die Anbieter von Wärmepumpen und die Hausbesitzenden richten.

Der Blick auf die Ergebnisse der Bewertung der Diffusionsdynamik zeigt drei Faktoren, mit denen die Akteure im Handwerk gestärkt und die Aktivitäten der Klimaschutzagenturen gezielt auf die zukünftigen Marktschwerpunkte ausgerichtet werden können.

- (1)** Die Ausbildung von Fachkräften für die Installation von Wärmepumpen bedarf hoher politischer Aufmerksamkeit. Der Mangel an Fachkräften und Bewerbern für eine Lehre darf nicht als Problem dem Handwerk allein überlassen bleiben.
- (2)** Ebenso muss durch Weiterbildung und Anreize erreicht werden, dass jeder Handwerksbetrieb, der Heizungen einbaut, auch das Thema Wärmepumpe beherrscht. Die Schwäche der Fachbetriebe bei der Planung und Realisierung von Wärmepumpen im Bestand bedarf ebenfalls der politischen Aufmerksamkeit.
- (3)** Ebenso sollte durch die Intermediäre zumindest in Süddeutschland die Beschäftigung mit der Wärmepumpe für den Neubau beendet werden und die Kapazitäten auf die Wärmepumpe im Bestand verschoben werden. In Norddeutschland sind die einschlägigen Anstrengungen dagegen auf beide Anwendungsbereiche auszuweiten.

Bei vollständigem Erfolg dieser Maßnahmen könnte die Diffusionsdynamik von Wärmepumpen für den Neubau um 3 Punkte und für den Bestand um 7 Punkte verbessert werden.

Weiter konnten Clausen und Fichter (2019) zeigen, dass für das Voranschreiten aus der Gruppe „Missing X“ in die Gruppe „Stars“ das „Kosten-Nutzen Verhältnis“ der Angebote und ihre Kompatibilität mit dem Umfeld und das Vertrauen in die Innovation (bzw. die empfundene Unsicherheit) von zentraler Bedeutung sind. Diesen Zusammenhängen sind ebenfalls eine Reihe von Faktoren zuzuordnen. Neben

- ▶ der „relative Vorteil der Innovation“ sowie
- ▶ die Adopter bezogenen Faktoren „Preis/ Kosten und Wirtschaftlichkeit“, die „Kompatibilität“, also die technische, institutionelle und kulturelle Anschlussfähigkeit der Innovation an ihr Umfeld sowie die „Notwendigkeit von Verhaltensänderungen“ und mögliche „Unsicherheiten bei Adoptoren“ und letztlich
- ▶ mögliche „selbstverstärkende Effekte im Diffusionsprozess“.

Wiederum mit Blick auf die Ergebnisse der Bewertung der Diffusionsdynamik zeigt diese drei Faktoren, bei denen die Entwicklung gefördert werden kann:

- (1)** Zum ersten ist es erforderlich, die Rahmenbedingungen der Energiepreise so zu verändern, dass sich Wärmepumpen in den allermeisten Anwendungsfeldern als wettbewerbsfähiger herausstellen als fossile Verbrenner-Heizungen, siehe hierzu Bundesverband Wärmepumpe e.V. (2021) sowie die grundsätzlichen Überlegungen zur Ausrichtung des Energieversorgungssystems von Zachmann et al. (2022),
- (2)** Weiter sollte noch stärker über die relativen Vorteile und die Wirtschaftlichkeit der Wärmepumpe aufgeklärt werden. Eine solche Kommunikation muss letztlich in der Lieferkette sowohl auf die Konsumierenden als auch das Handwerk gerichtet sein.
- (3)** Ein zweiter Schwerpunkt der Kommunikation muss in der Thematisierung von Bedenken in Bezug auf die Funktionalität Sicherheit von Wärmepumpenlösungen liegen.

Bei vollständigem Erfolg dieser Maßnahmen könnte die Diffusionsdynamik von Wärmepumpen für den Bestand um weitere 4 Punkte verbessert werden. Für den Neubau bieten diese Maßnahmen kaum ein Potenzial der Verbesserung der Diffusionsdynamik,

Es fällt auf, dass ein Erfolg von Anstrengungen zur weiteren Verbreitung der Wärmepumpe im Gebäudebestand sowohl Aktivitäten der Politik zur Veränderung von Rahmenbedingungen wie auch einer Kommunikation in Richtung auf die Hausbesitzenden bedarf.

5.1 Kommunikation

Die zentralen treibenden Faktoren, die für eine stärkere Akzeptanz der Wärmepumpe aktiviert werden müssten, dürften zum einen die Bekanntheit der Wärmepumpe und das Framing als einziges Heizungssystem sein, welches mit erneuerbarem Strom, teilweise sogar mit dem von der eigenen PV-Anlage, betrieben werden kann und damit kompatibel mit einem klimaneutralen Energiesystem der Zukunft ist. Auch die im Vergleich zu allen anderen Heizungssystemen extrem gute Effizienz der Ausnutzung des erzeugten Primärstroms für die Wärmeerzeugung ist von Bedeutung insbesondere, um den Mythos des Heizens durch Verbrennung von Wasserstoff zu widerlegen (Perner, Unteutsch, & Lövenich, 2018; Zachmann et al., 2021).

Weiter ist für die Kommunikation von Bedeutung, dass die Wärmepumpe fast uneingeschränkt skalierbar, also nicht wie z.B. Biomasseheizungen aufgrund von Rohstoffknappheit nur in eine begrenzte Zahl von Häusern eingebaut werden kann. Wichtig sind weiter Preis und Wirtschaftlichkeit. Für die Frage der Beurteilung des Nutzens ist auch wichtig, dass eine Wärmepumpe in den zunehmend heißen Sommern in Kombination mit einer eigenen PV-Anlage in der Lage ist, quasi kostenlos und ohne externen zusätzlichen Stromverbrauch die Klimatisierung des Hauses zu leisten. Das Kosten-Nutzen Verhältnis wird wenig überraschend immer wieder als starker Treiber neuer Lösungen in Richtung auf größere Marktanteile identifiziert (Clausen & Fichter, 2019). Wirken kann eine hohe Wirtschaftlichkeit aber nur, wenn die neue Lösung bekannt ist und vermutet wird, dass sie neben den Ansprüchen an Umweltfreundlichkeit und Kosten auch die Ansprüche an eine sichere Wärmeversorgung erfüllt.

5.2 Rechtliche und institutionelle Maßnahmen

Die für ein rasches Marktwachstum notwendigen rechtlichen Schritte werden recht vollständig in der „Roadmap Wärmepumpe“ des Bundesverbandes Wärmepumpe (2021) wiedergegeben.

Die Aufstellung enthält aber eine wesentliche Lücke. Wenn das Ziel für 2030 bis 2050 wirklich darin besteht überall dort, wo der vorhandene Gebäudebestand nicht durch Wärmenetze versorgt wird, diesen durchgängig mit Wärmepumpen auszurüsten, dann könnte das von Bertram et al. (2014), Kriesi (2017) und Witte (2019) identifizierte Problem der absinkenden Jahresmitteltemperatur von Erdsonden sich überall dort als störend erweisen, wo die Dichte und Position der Erdwärmesonden nicht durch die kommunale Wärmeplanung optimiert wird. Die Begründung hierfür ergibt sich aus der folgenden Argumentationskette:

- ▶ Kriesi (2017) stellt dort eine erhöhte Wahrscheinlichkeit für Probleme mit einer sinkenden Jahresmitteltemperatur fest, wo innerhalb eines Radius von 30 m um eine Erdwärmesonde weitere Sonden installiert sind und der Konkurrenzeffekt nicht durch eine starke Grundwasserströmung ausgeglichen wird. Das Problem zu hoher Wärmeentnahme wird auch von (Bertram et al., 2014; Hüsing et al., 2017; Witte, 2019) beschrieben und untersucht.
- ▶ Wenn aber in bestehenden Baugebieten die Heizung mit der Wärmepumpe nicht mehr die große Ausnahme ist – wie heute – sondern die Regel, dann dürfte in Gebieten ohne starke Grundwasserströmung das von Kriesi identifizierte Problem mit einem Zeitverzug von 5 bis 20 Jahren an immer mehr Orten auftauchen.
- ▶ Die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten des Problems lässt sich aber durch mehrere Ansätze mindern. Zum einen könnte die kommunale Wärmeplanung grundstücksbezogene Bohrpositionen empfehlen oder auch festlegen. Bei nebeneinander liegenden Reihenhäusern würde z.B. empfohlen bzw. festgelegt, dass in jedem zweiten Haus direkt an der Straße gebohrt werden sollte, u.U. sogar schräg unter die Straße. In den Häusern dazwischen würde empfohlen bzw. festgelegt, dass die Bohrung möglichst weit hinten auf dem Grundstück erfolgen und ggf. auch schräg unter das Gebäude geführt werden sollte. Auch könnten durch die kommunale Wärmeplanung bestimmte Grundstücke zur Nutzung von Luftwärmepumpen verpflichtet werden, um so Fehlinvestitionen in ein zu dichtes und damit dysfunktionales Netz von Erdsondenbohrungen zu vermeiden. Die Position von zukünftig entstehenden Erdwärmesonden müsste also Gegenstand der kommunalen Wärmeplanung werden.
- ▶ Weiter lässt sich die Wahrscheinlichkeit des von Kriesi befürchteten Problems mit einer sinkenden Jahresmitteltemperatur durch Maßnahmen der Regeneration senken (Kriesi, 2017, S. 31). Hierzu ist eine Raumkühlung durch Flächenheizungen, die sommerliche Regeneration durch Wärme aus Sonnenkollektoranlagen oder aus einem mit der Wärmepumpe im Sommer betriebenen Außenluftkühler vorzusehen. Die Notwendigkeit einer Regeneration von Erdsondenbohrungen könnte im Rahmen der Genehmigung festgestellt und der Betrieb von Anlagen zur Regeneration vorgeschrieben werden.

Witte (2019) schlägt vor, die Menge des dauerhaft möglichen maximalen Wärmeentzugs für die einzelnen Wohnlagen zu berechnen und eine Grenze für die Menge der zu entnehmenden Wärme festzulegen. Die Auslegung einzelner Systeme müsste sich dann an diesen Grenzwerten orientieren. Das von Witte vorgeschlagene Verfahren wäre quasi eine flächenbezogene und an die lokalen Gegebenheiten angepasste Planung des möglichen Wärmentszugs und wäre, wenn es für zahlreiche benach-

barte Grundstücke, also ganze Quartiere, gleichzeitig durchgeführt würde, deutlich weniger aufwendig, als wenn jede Anlage einzeln geplant würde. Reinhard (2019) geht mit Blick auf die langfristig als stark steigend anzunehmende Zahl von Wärmepumpen sogar so weit, Empfehlungen für die Lage eines möglichen Erdwärmekollektors auf jedem einzelnen Grundstück auszusprechen.

Vorsorgende Maßnahmen im Rahmen der kommunalen Wärmeplanung sollten also schon auf Basis der Befürchtung, dass Fälle zu hohen Wärmetzugs in Verbindung mit Vereisung zukünftig auftreten könnten, getroffen werden. Aufgrund der langen Zeitkonstante der Entwicklung kann nicht bis zum Eintreten eines Schadens gewartet werden. Wichtig wäre jedoch, die systematische und möglichst flächendeckende Erhebung von Daten zur Jahresmitteltemperatur (digitalisiert und automatisiert) in Gang zu setzen, so dass im Laufe der nächsten Jahre Erfahrungen mit der vermutlich – aufgrund unterschiedlicher Boden- und Grundwasserverhältnisse - lokal deutlich unterschiedlichen Probleme mit der Jahresmitteltemperatur gesammelt werden können. Nur auf Basis umfangreicher empirischer Daten lässt sich ein Prozess steuern, der in nur knapp 20 bis 30 Jahren die Mehrzahl der Einfamilien- und Doppelhäuser auf Wärmepumpen umsteuern will.

5.3 Forschung und Entwicklung

Aus Sicht der hier vorliegenden Analyse der Diffusionsdynamik von Wärmepumpen lässt sich F&E-Bedarf an einigen Stellen identifizieren:

Lebensdauer: Die erwartete Lebensdauer der Wärmepumpen mit 20 bis 25 Jahren wie auch der Erdwärmesonden mit 50 bis 100 Jahren ist sehr groß und erweckt hohe Erwartungen. Mit Blick auf die von Kriesi (2017) aufgezeigten komplexen Wechselwirkungen mit dem Boden und dem Grundwasser wären beobachtende Analysen des langfristigen Verhaltens der Erdwärmesonden sehr wünschenswert. Aber auch mit Blick auf die Wärmepumpen und die in den Fußböden und Wänden weitgehend unzugänglich und damit kaum reparierbar verbauten Flächenheizungen wären ergänzend zu den in der Branche üblichen Bauteilprüfungen auch Untersuchungen des Langzeitverhaltens und der Lebensdauer der aus den Teilen aufgebauten Heizungssysteme von hoher Bedeutung.

Platzierung von Erdwärmesonden in Bestandsquartieren: Gerade in Gebieten mit kleinen und im Fall von Reihenhäusern für Bohrgeräte schlecht zugänglichen Grundstücken sollten Konzepte entwickelt werden, wo die aus Effizienzgründen wünschenswerten Erdwärmesonden platziert werden können. Diese Konzepte sollten anschlussfähig an die gegenwärtig bundesweit einsetzende kommunale Wärmeplanung sein (Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg, 2021) und gezielt die Bedeutung der kommunalen Wärmeplanung für langfristig stabile Erdwärmehohrungen untersuchen.

QUELLEN

- AGEB. (2021). *Energieverbrauch in Deutschland Daten für das 1. Bis 3. Quartal 2021*. Münster. Abgerufen von <https://www.ag-energiebilanzen.de/>
- AGFW e.V. (2014). *Transformationsstrategien Fernwärme TRAF0 - Ein Gemeinschaftsprojekt von ifeu-Institut, GEF Ingenieur AG und AGFW*. Frankfurt am Main: Arbeitsgemeinschaft Fernwärme (AGFW). Abgerufen von Arbeitsgemeinschaft Fernwärme (AGFW) website: http://www.eneff-stadt.info/fileadmin/media/Publikationen/Dokumente/Endbericht_Transformationsstrategien_FW_IFEU_GEF_AGFV.pdf
- Agora Energiewende. (2019). *Wie werden Wärmenetze grün?* Berlin. Abgerufen von https://www.agora-energiewende.de/fileadmin2/Projekte/2019/Waermenetze/155_Waermenetze_WEB.pdf
- Arpagaus, C., Bless, F., Uhlmann, M., Schiffmann, J., & Bertsch, S. S. (2018, 12.7). *High Temperature Heat Pumps: Market Overview, State of the Art, Research Status, Refrigerants, and Application Potentials*. Gehalten auf der International Refrigeration and Air Conditioning Conference, Lafayette IN.
- Asendorpf, D. (2021, November 18). Wärmewende, hausgemacht. *Die Zeit*.
- B E T Büro für Energiewirtschaft und technische Planung GmbH. (2019). *Machbarkeitsstudie Kohleausstieg und nachhaltige Fernwärmeversorgung Berlin 2030*. Aachen. Abgerufen von https://www.berlin.de/senuvk/klimaschutz/kohleausstieg/download/MBS_Berlin_Endbericht.pdf
- Baehr, H. D., & Kabelac, S. (2016). *Thermodynamik: Grundlagen und technische Anwendungen* (16., aktualisierte Auflage). Berlin: Springer Vieweg.
- Baunetz-Wissen. (2022). Jahresarbeitszahl. Abgerufen 22. Januar 2022, von Baunetz-Wissen website: <https://www.baunetzwissen.de/glossar/j/jahresarbeitszahl-46869>
- Bertram, E., Pärish, P., Mercker, O., Arnold, O., Tepe, R., & Rockendorf, G. (2014). *Hocheffiziente Wärmepumpensysteme mit Geo- und Solarthermie-Nutzung*. Emmertal.
- beste-waermepumpe.de. (2021). Stiftung Warentest: Wärmepumpen im Test – Vergleich. Abgerufen 9. Dezember 2021, von Beste-waermepumpe.de website: <http://www.beste-waermepumpe.de/stiftung-warentest-waermepumpen-im-test-vergleich-waermepumpe/>
- Blauer Engel. (2021). Blauer Engel Produkte und Dienstleistungen. Abgerufen 11. Dezember 2021, von Blauer Engel website: <https://www.blauer-engel.de/de/produkte>
- 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>
- Bundesindustrieverband Deutschland Haus-, Energie- und Umwelttechnik, & Shell. (2013). *Shell BDH Hauswärme-Studie Fakten, Trends und Perspektiven für Heiztechniken bis 2030*. Hamburg, Köln. Abgerufen von <http://s08.static-shell.com/content/dam/shell-new/local/country/deu/downloads/pdf/comms-shell-bdh-heating-study-2013.pdf>
- Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz. (2021). Leitmärkte mit Zukunftspotential. Abgerufen 12. Dezember 2021, von Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz website: <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Textsammlungen/Industrie/leitmaerkte-mit-zukunftspotential.html>
- Bundesregierung. (2020). *Gesetz zur Vereinheitlichung des Energieeinsparrechts für Gebäude und zur Änderung weiterer Gesetze (Gebäudeenergiegesetz—GEG)*. Abgerufen von

[https://www.bgbl.de/xaver/bgbl/start.xav?startbk=Bundesanzeiger_BGBI&bk=Bundesanzeiger_BGBI&start=//*\[@attr_id=%27bgbl107s1519.pdf%27\]#__bgbl__%2F%2F*%5B%40attr_id%3D%27bgbl120s1728.pdf%27%5D__1603811241858](https://www.bgbl.de/xaver/bgbl/start.xav?startbk=Bundesanzeiger_BGBI&bk=Bundesanzeiger_BGBI&start=//*[@attr_id=%27bgbl107s1519.pdf%27]#__bgbl__%2F%2F*%5B%40attr_id%3D%27bgbl120s1728.pdf%27%5D__1603811241858)

- Bundesverband der Deutschen Heizungsindustrie (BDH). (2021a). *Marktentwicklung Wärmeerzeuger Deutschland 2011 bis 2020*. Berlin. Abgerufen von <https://www.bdh-industrie.de/presse/pressegrafiken>
- Bundesverband der Deutschen Heizungsindustrie (BDH). (2021b). Wärmewende: Green Deal und Klimaschutzgesetz. Abgerufen 10. Dezember 2021, von Bundesverband der Deutschen Heizungsindustrie (BDH) website: <https://www.bdh-industrie.de/waermewende>
- Bundesverband der Energie und Wasserwirtschaft e.V. (2014). *Grundsatzstudie zum Entscheidungsverhalten bei der Auswahl von Gasheiztechnologien im Wettbewerbsumfeld*. Berlin. Abgerufen von https://www.bdew.de/media/documents/20140228_BDEW-Heizung-Modernisierer-Studie-Zusammenfassung.pdf
- Bundesverband Geothermie e.V. (2021). Der Verband im Portrait. Abgerufen 10. Dezember 2021, von Bundesverband Geothermie website: <https://www.geothermie.de/verband/der-verband-im-portrait.html>
- Bundesverband Wärmepumpe e.V. (2019). *Gewerbeobjekte und Industrieanlagen mit Wärmepumpe*. Berlin. Abgerufen von https://www.waermepumpe.de/fileadmin/user_upload/waermepumpe/07_Publikationen/Publikationen/BWP_Gewerbe-mit-WP_WEB.pdf
- Bundesverband Wärmepumpe e.V. (2021a). Förderrechner Wärmepumpe. Abgerufen 11. Dezember 2021, von Wärmepumpe website: <https://www.waermepumpe.de/foerderrechner/>
- Bundesverband Wärmepumpe e.V. (2021b). Verbandsprofil. Abgerufen 10. Dezember 2021, von Wärmepumpe website: <https://www.waermepumpe.de/verband/verbandsprofil/>
- Bundesverband Wärmepumpe e.V. (2021c). Wie funktioniert die Wärmepumpe? Abgerufen 6. Dezember 2021, von www.waermepumpe.de website: <https://www.waermepumpe.de/waermepumpe/funktion-waermequellen/>
- Bundesverband Wärmepumpe e.V. (2022a). Absatzzahlen und Marktanteile. Abgerufen 24. Februar 2022, von www.waermepumpe.de website: <https://www.waermepumpe.de/presse/zahlen-daten/>
- Bundesverband Wärmepumpe e.V. (2022b, Februar 22). Fachbetrieb Wärmepumpe. Abgerufen 22. Januar 2022, von Bundesverband Wärmepumpe (BWP) e.V. website: <https://www.waermepumpe.de/fuer-handwerker/fachbetrieb-waermepumpe/>
- Bundesverband Wärmepumpe e.V. (bwp). (2021). *Roadmap Wärmepumpe. Der Weg zur Dekarbonisierung des Gebäudesektors*. Berlin. Abgerufen von file:///C:/Users/clausen/AppData/Local/Temp/2021-04-29_BWP_Roadmap_final.pdf
- Bundesverband Wärmepumpe e.V. (2016). *Leitfaden Erdwärme. Grundlagenwissen und Praxistipps*. Berlin. Abgerufen von file:///C:/Users/clausen/AppData/Local/Temp/Leitfaden_Erdwaerme_2018_Web.pdf
- Clausen, J., & Fichter, K. (2019). The diffusion of environmental product and service innovations: Driving and inhibiting factors. *Environmental Innovation and Societal Transitions*, 31, 64–95. <https://doi.org/10.1016/j.eist.2019.01.003>
- Clausen, J., & Fichter, K. (2021). *Transformation der Wärmeversorgung. Eine Pfadwechselkonzeption*. Berlin: Borderstep Institut.

- Clausen, J., Fichter, K., & Winter, W. (2011). *Theoretische Grundlagen für die Erklärung von Diffusionsverläufen von Nachhaltigkeitsinnovationen*. Berlin: Borderstep Institut für Innovation und Nachhaltigkeit.
- Clausen, J., & Steudle, L. (2016). *Materialband 10: Handwerkliche Produkt-Dienstleistungssysteme. Umweltinnovationen und ihre Diffusion als Treiber der Green Economy*. Berlin: Borderstep Institut für Innovation und Nachhaltigkeit. Abgerufen von Borderstep Institut für Innovation und Nachhaltigkeit website: https://www.borderstep.de/wp-content/uploads/2016/08/10_UBA-MaterialbandHandwerklicheDL-PUB_final-2.pdf
- Dena. (2018). *Dena-Leitstudie Integrierte Energiewende*. Berlin: Deutsche Energie-Agentur GmbH. Abgerufen von Deutsche Energie-Agentur GmbH website: https://www.dena.de/fileadmin/dena/Dokumente/Pdf/9261_dena-Leitstudie_Integrierte_Energiewende_lang.pdf
- Der Spiegel. (1980). *Heiße Ware aus Wasser, Luft und Erde. Wird die Wohnung mit Hilfe der „Ölspar-Maschine“ Wärmepumpe wieder preiswert warm?* (43).
- DWD. (2018). *Klimareport Niedersachsen. Fakten bis zur Gegenwart—Erwartungen für die Zukunft*. Hannover: Niedersächsisches Ministerium für Umwelt, Energie, Bauen und Klimaschutz, DWD.
- Effizienzhaus Online. (2021). Erdwärmepumpe (Sole Wasser Wärmepumpe): Umweltfreundlich und effizient heizen. Abgerufen 11. Dezember 2021, von Effizienzhaus Online website: <https://www.effizienzhaus-online.de/erdwaermepumpe/?gclid=CNuHscTGkMsCFQ8W0wo-daakArw>
- energate messenger. (2021, September 28). Zu wenig Handwerker setzen sich ernsthaft mit der Wärmepumpe auseinander. Interview mit Martin Sabel, bwp. Abgerufen 22. Januar 2022, von Energate messenger website: <https://www.energate-messenger.de/news/215641/zu-wenig-handwerker-setzen-sich-ernsthaft-mit-der-waermepumpe-auseinander>
- Energieheld. (2021). Die Wärmepumpe—Alle Arten, Vorteile und Nachteile. Abgerufen 8. Dezember 2021, von Energieheld website: <https://www.energieheld.de/heizung/waermepumpe#kosten>
- Fichter, K., & Clausen, J. (2013). *Erfolg und Scheitern „grüner“ Innovationen*. Marburg: Metropolis.
- Fischer, S., & Then, D. (2018, März 20). 8 typische Fehler bei der Planung und Installation von Wärmepumpen vermeiden. Abgerufen 22. Januar 2022, von Haustec.de website: <https://www.haustec.de/heizung/waermeerzeugung/8-typische-fehler-bei-der-planung-und-installation-von-waermepumpen>
- Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V. (2021). *Wärmepumpen-Fahrplan. Finanzielle Kippunkte zur Modernisierung mit Wärmepumpen im Wohngebäudebestand*. München.
- Fraunhofer ISE. (2020). *Wärmepumpen in Bestandsgebäuden*. Freiburg. Abgerufen von file:///C:/Users/clausen/AppData/Local/Temp/BMWi-03ET1272A-WPsmart_im_Bestand-Schlussbericht.pdf
- Gellrich, A. (2016). *Von der Minderheit zur Mehrheit? Psycho-soziale Einflüsse bei der Verbreitung klimaschonender Innovationen*. Kassel. Abgerufen von <http://kobra.bibliothek.uni-kassel.de/bitstream/urn:nbn:de:hebis:34-2016122151775/5/DissertationAngelikaGellrich.pdf>
- Grimm, A. (2021). *E-Mail zur Nutzungs- bzw. Lebensdauer von Flächenheizungen (mit Wärmepumpe)*.
- Hintemann, R., & Hinterholzer, S. (2020). *Rechenzentren in Europa – Chancen für eine nachhaltige Digitalisierung—Teil 1*. Berlin: Allianz zu Stärkung digitaler Infrastrukturen in Deutschland. Abgerufen von Allianz zu Stärkung digitaler Infrastrukturen in Deutschland website: <https://digitale-infrastrukturen.net/studie-nachhaltige-digitalisierung-in-europa/>

- 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
- HWK-Hannover. (2022, Januar 22). Handwerkersuche. Abgerufen 22. Januar 2022, von HWK-Hannover website: <https://www.hwk-hannover.de/betriebe/suche-23,585,bdbsearch.html?searchsearchterm=W%C3%A4rmepumpe&search-filter-zipcode=30659&search-filter-radius=250&search-filter-jobnr=&search-job=&search-local=&search-filter-training=&search-filter-experience=>
- KEAN. (2021). Wärmepumpen in Siedlungen und Quartieren. Abgerufen 11. Dezember 2021, von KEAN website: <https://www.klimaschutz-niedersachsen.de/themen/waerme/waermepumpe/waermepumpen-in-siedlungen-und-quartieren.php>
- Kleinhüchelkotten, S. (2006, November). *Soziale Milieus als Zielgruppen für die Nachhaltigkeitskommunikation*. Gehalten auf der Hannover. Hannover. Abgerufen von http://www.21-kom.de/fileadmin/user_upload/PDFs/02_Sinus_Milieus/03_Kleinhueckelkotten_Soziale_Milieus_als_Zielgruppen.pdf
- Kleinhüchelkotten, S., Neitzke, H.-P., & Moser, S. (2016). *Repräsentative Erhebung von Pro-Kopf-Verbräuchen natürlicher Ressourcen in Deutschland (nach Bevölkerungsgruppen)* (UBA-FB Nr. 29/2016). Umweltbundesamt.
- Kriesi, R. (2017). *Bericht «Analyse von ErdwärmesondenanlagenBericht»*. Wädenswil. Abgerufen von file:///C:/Users/clausen/AppData/Local/Temp/8872-Schlussbericht%20Kriesi.pdf
- Miara, M. (2021a). *Wärmepumpen in Bestandsgebäuden. Modernisieren mit Wärmepumpen – Möglichkeiten und Grenzen*. Gehalten auf der Aktionskreis Energie Online. Abgerufen von <https://aktionskreis-energie.de/events/waermepumpen-im-bestand/>
- Miara, M. (2021b, Juni). *Online: Die Rolle von Wärmepumpen in der Energiewende: Fokus auf Bestandsgebäude*. Gehalten auf der Deutsche Physikalische Gesellschaft, Berlin.
- Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg. (2021). *Kommunale Wärmepfanung. Handlungsleitfaden*. Stuttgart. Abgerufen von <https://www.baden-wuerttemberg.de/de/service/publikation/did/handlungsleitfaden-kommunale-waermeplanung/>
- M-Tec Energie Innovativ. (2021). 10 Mythen zum Thema Wärmepumpen. Abgerufen 8. Dezember 2021, von M-Tec Energie Innovativ website: <https://m-tec.at/10-mythen-zum-thema-waermepumpen/>
- Perner, J., Unteutsch, M., & Lövenich, A. (2018). *Die zukünftigen Kosten strombasierter synthetischer Brennstoffe*. Köln. Abgerufen von https://www.agora-energiewende.de/fileadmin2/Projekte/2017/SynKost_2050/Agora_SynCost-Studie_WEB.pdf
- Pricewaterhouse Coopers. (2020). *Chancen und Risiken für die deutsche Heizungsindustrie im globalen Wettbewerb. PwC-Studie 2020: Wärmepumpen für die Wärmeversorgung von Gebäuden haben großes Potenzial*. Düsseldorf. Abgerufen von <https://www.pwc.de/de/energiewirtschaft/die-deutsche-heizungsbranche.html>
- Quaschnig, V. (2006). *Renais-sance der Wärme-pumpe*. Abgerufen 8. Dezember 2021, von Volker-quaschnig.de website: <https://volker-quaschnig.de/artikel/waermepumpe/index.php>
- Reinhard, T. (2019, Mai). *Beispiele aus der Projektpraxis*. Gehalten auf der Nachbarschaftliche Beeinflussung von Geothermieanlagen:, Freiburg.
- Rogers, E. M. (2003). *Diffusion of innovations* (Bd. 5). New York: Free Press. Borderstep Büro Berlin.

- Sabel, M. (2021). *E-Mail zur Nutzungsdauer von Erdwärmesonden*.
- 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>
- Schwinghammer, F. (2012). *Thermische Nutzung von Oberflächengewässern*. Freiburg i. Br. Abgerufen von http://www.hydrology.uni-freiburg.de/abschluss/Schwinghammer_F_2012_MA.pdf
- SPD, Die Grünen, & FDP. (2021). *Mehr Fortschritt wagen. Bündnis für Freiheit, Gerechtigkeit und Nachhaltigkeit*. Berlin.
- Statistisches Bundesamt. (2018). *Gebäude und Wohnungen. Bestand an Wohnungen und Wohngebäuden Bauabgang von Wohnungen und Wohngebäuden Lange Reihen ab 1969—2018*. Wiesbaden. Abgerufen von https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Wohnen/Publikationen/Downloads-Wohnen/fortschreibung-wohnungsbestand-pdf-5312301.pdf?__blob=publicationFile
- Thomasnet.com. (2021, Dezember 18). Top Heat Pump Manufacturers and Suppliers Share: Abgerufen von Thomasnet.com website: <https://www.thomasnet.com/articles/top-suppliers/heat-pump-manufacturers-and-suppliers/>
- 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
- TWK - Test- und Weiterbildungszentrum Wärmepumpen und Kältetechnik GmbH. (2021). EU-Zertifizierter Wärmepumpeninstallateur. Abgerufen 8. Dezember 2021, von <https://www.twk-karlsruhe.de/Kurse/Waermepumpen-Installateur>
- Umweltbundesamt. (2017). *Klimaschutz im Stromsektor 2030 – Vergleich von Instrumenten zur Emissionsminderung*. Dessau-Roßlau. Abgerufen von https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1/publikationen/2017-01-11_cc_02-2017_strommarkt_endbericht.pdf
- Umweltbundesamt. (2019). *Wege in eine ressourcenschonende Treibhausgasneutralität. RESCUE - Studie*. Dessau-Roßlau. Abgerufen von https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/rescue_studie_cc_36-2019_wege_in_eine_ressourcenschonende_treibhausgasneutralitaet.pdf
- Umweltbundesamt. (2020). Bilanz 2019: CO₂-Emissionen pro Kilowattstunde Strom sinken weiter. Abgerufen 17. Juli 2021, von Umweltbundesamt website: <https://www.umweltbundesamt.de/presse/pressemitteilungen/bilanz-2019-co2-emissionen-pro-kilowattstunde-strom>
- Umweltbundesamt. (2021). Wärmepumpen. Abgerufen 11. Dezember 2021, von Umweltbundesamt website: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/fluorierte-treibhausgase-fckw/anwendungsbereiche-emissionsminderung/waermepumpen>
- Verbraucherzentrale Rheinland-Pfalz. (2019). *Bundesweite Verbraucherbefragung zum Thema Wärmepumpen*. Mainz. Abgerufen von https://www.haustec.de/sites/default/files/2019-07/vz_waermepumpenbericht_2019.pdf
- Witte, H. (2019, Mai). *Nachbarschaftliche Beeinflussung von Geothermieanlagen: Methode zur Berechnung der nachbarschaftlichen Beeinflussung*. Gehalten auf der Nachbarschaftliche Beeinflussung von Geothermieanlagen:, Freiberg.
- Zachmann, G., Holz, F., Kemfert, C., McWillimas, B., Meissner, F., Roth, A., & Sogalla, R. (2022). *Decarbonisation of the energy system*. Brüssel. Abgerufen von <https://www.bruegel.org/2022/01/decarbonisation-of-the-energy-system/>

Zachmann, G., Holz, F., Roth, A., McWillimas, B., Sogalla, R., Meissner, F., & Kemfert, C. (2021). *Decarbonisation of Energy Determining a robust mix of energy carriers for a carbon-neutral EUR*. Luxemburg. Abgerufen von file:///C:/Users/JENSCL~1/AppData/Local/Temp/I-POL_STU(2021)695469_EN.pdf