

FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR ENERGIEWIRTSCHAFT UND ENERGIESYSTEMTECHNIK, IEE

FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR SOLARE ENERGIESYSTEME, ISE

WÄRMEPUMPENPROFILSTUDIE

Lastprofile von Wärmepumpenkollektiven
sowie Szenarien zur Marktdurchdringung von
flexiblem Betrieb

WÄRMEPUMPENPROFILSTUDIE

Lastprofile von Wärmepumpenkollektiven
sowie Szenarien zur Marktdurchdringung von
flexiblem Betrieb

Dr.-Ing. Michael Krause, Dr. Sarah Becker, Norman Gerhardt

Fraunhofer IEE
Joseph-Beuys-Straße 8
34117 Kassel, Deutschland
www.iee.fraunhofer.de

Sebastian Herkel

Fraunhofer ISE
Heidenhofstraße 2
79110 Freiburg
www.ise.fraunhofer.de

beauftragt durch:
TenneT TSO GmbH, stellvertretend für die 4 ÜNB
Bernecker Straße 70
95448 Bayreuth
Deutschland

Inhaltliche Begleitung (AG-seitig) durch Arbeitskreis Netzausbauplanung

Datum: 05.08.2026

öffentlich

1	ZUSAMMENFASSUNG	4
2	EINLEITUNG	6
2.1	HINTERGRUND	6
2.2	VORGEHENSWEISE DER STUDIE	6
2.3	STRUKTUR DER STUDIE	7
2.4	VERWENDETER DATENPOOL	8
3	BETRIEBSVERHALTEN VON WÄRMEPUMPEN	12
3.1	BETRACHTUNG VON EINZELANLAGEN	12
3.2	CLUSTERUNG DES ANLAGENPOOLS	14
3.3	MESSWERTBASIERTE TAGESLASTPROFILE	17
4	SIMULATIONSMODELLE	21
4.1	NOTWENDIGKEIT VON SIMULATIONSDATEN ZUSÄTZLICH ZU MESSDATEN	21
4.2	SIMULATIONSMODELLE	21
4.2.1	<i>Eingangsdaten und Annahmen</i>	<i>21</i>
4.2.2	<i>Thermische Lastgänge</i>	<i>24</i>
4.2.3	<i>Modellierung Wärmepumpen-Betrieb</i>	<i>27</i>
4.3	ERSTELLUNG AGGREGIERTER WÄRME- UND STROMPROFILE	29
4.3.1	<i>Gebäudegruppen und Aggregation</i>	<i>30</i>
4.3.2	<i>Zusätzliche Zeitreihen</i>	<i>32</i>
4.3.3	<i>Träge Tagesmitteltemperatur</i>	<i>32</i>
4.3.4	<i>Wärmemenge in Abhängigkeit der Außentemperatur (SigLinDe)</i>	<i>33</i>
4.3.5	<i>Effektiver COP</i>	<i>34</i>
4.3.6	<i>Simulationsbasierte Tagesprofile</i>	<i>35</i>
4.3.6.1	<i>Raumwärme-Bereitstellung</i>	<i>35</i>
4.3.6.2	<i>Heizstabanteile</i>	<i>37</i>
4.3.7	<i>Hinweise zur Nutzung/Zuordnung der GHD-Profile</i>	<i>39</i>
5	FLEXIBLER BETRIEB VON WÄRMEPUMPEN	40
5.1	STAND DER TECHNIK UND TECHNISCHE MINDESTAUSSTATTUNG ZUR FLEXIBILISIERUNG	40
5.1.1	<i>Potenzial und Betrieb</i>	<i>40</i>
5.1.2	<i>Technische Flexibilitätsoptionen</i>	<i>42</i>
5.2	PREISMECHANISMEN ZUR ERSCHLIEßUNG VON FLEXIBILITÄTEN VON WÄRMEPUMPEN	43
5.2.1	<i>Dynamischer Strompreis mit Orientierung am Börsenstrompreis und dessen Dämpfung durch sonstige Stromkostenbestandteile</i>	<i>44</i>
5.2.2	<i>Netzentgelte</i>	<i>44</i>
5.2.3	<i>Eigenstromerzeugung und Flexibilität</i>	<i>45</i>
5.2.4	<i>Qualitative Einordnung der Wirtschaftlichkeit der Flexibilisierung von Wärmepumpen</i>	<i>45</i>
5.3	SZENARIEN FÜR DEN HOCHLAUF DER FLEXIBILITÄTSOPTIONEN	46
	LITERATUR	51

Mit dem zu erwartenden Hochlauf von Wärmepumpen und Elektromobilität im Zuge der Energiewende resultiert eine zunehmende Gesamtlast im Stromnetz, die Netzbetreiber in der Netzplanung berücksichtigen müssen. Wärmepumpen zur Raumheizung werden in ihrem Betriebsverhalten und ihrer Leistungsaufnahme vor allem durch die aktuelle Außentemperatur beeinflusst, weitere Einflussgrößen sind die Außentemperatur an vorhergehenden Tagen sowie das Nutzerverhalten. Durch Auslegung und Steuerungsparameter können bei einzelnen Wärmepumpen zudem bei gleichen Umgebungsparametern sehr unterschiedliche Betriebszustände auftreten. Für einen Pool an Wärmepumpen liegt typischerweise eine Mittelung vor, die zu charakteristischen Tagesgängen führt.

In der Studie werden ausgehend von realen Betriebsdaten durch geeignetes Clustern die relevanten Einflussfaktoren auf das Betriebsverhalten von Wärmepumpen beschrieben. Hierauf aufbauend werden mit Hilfe von dynamischen Simulationen Tageslastgänge für verschiedene, deutschlandweit typische Standorte – Hamburg, Kassel und München – für einen Pool an Wärmepumpen in Abhängigkeit der ermittelten relevanten Einflussfaktoren ermittelt.

Als zentrales Ergebnis der Betriebsdatenanalyse zeigt sich, dass ein Großteil der in Deutschland installierten Anlagen eine Dimensionierung aufweisen, die selbst an kalten Tagen keinen/kaum Heizstab benötigen und damit monovalent betrieben werden. Für kalte Tage lässt sich aus den Messdaten vermuten, dass im Mittel über alle Anlagen an Tagen mit Außentemperaturen von $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$ die Gebäude nur ca. 60 % der Energie benötigen, die die Wärmepumpen im Tagesmittel bereitstellen könnten. Mögliche Gründe hierfür sind:

- Sehr kalte Tage sind zumeist sonnige Tage, so dass die thermischen Lasten an diesen Tagen niedriger liegen, als bei reiner Berücksichtigung der Außentemperatur zu erwarten ist.
- Alte Heizungsanlagen waren häufig überdimensioniert, beim Austausch dieser durch Wärmepumpen wird die Leistung des alten Wärmeerzeugers oft als Richtwert herangezogen.
- Die Heizlastberechnung (zur Bestimmung der zu installierenden thermischen Leistung nach DIN EN 12381) als statisches Verfahren berücksichtigt das Nutzerverhalten insbesondere an kalten Tagen nur ungenügend. Die im Vergleich zur theoretischen Heizlast beobachteten niedrigeren Lastspitzen deuten darauf hin, dass in der Praxis an kalten Tagen weniger gelüftet und/oder die Beheizung stärker reduziert wird als in der Norm angenommen.

Hieraus lässt sich ableiten, dass die elektrische Last installierter Wärmepumpen im Mittel über viele Anlagen an kalten Tagen niedriger ist, als es sowohl hinsichtlich ihrer installierten Leistung als auch hinsichtlich der DIN-Heizlast der zu versorgenden Gebäude zu erwarten wäre. Des Weiteren kann aus dieser Überdimensionierung abgeleitet werden, dass auch der zu erwartende Heizstabeinsatz niedriger als vermutet ist.

Das reale Nutzerverhalten lässt sich insbesondere anhand der ausgewerteten Tageslastgänge erkennen. Im Tagesverlauf zeigt sich ein stark ausgeprägter Morgenpeak beginnend um ca. 6 Uhr, bedingt durch die Wiederaufheizung nach der Nachtabenkung und morgendliches Lüften, und ein deutlich niedriger Abendpeak um ca. 19 Uhr. In den Nachtstunden sind deutlich reduzierte elektrische Lasten zu beobachten. Die

ergänzenden simulationsbasierten Untersuchungen für die Standorte Hamburg, Kassel und München zeigen, dass selbst in den Morgenstunden im Pool die elektrische Gesamtlast trotz des Einsatzes von Heizstäben niedriger als die installierte elektrische Leistung der Wärmepumpen (ohne Berücksichtigung des Heizstabes) ist.

Zusammenfassung

Zusammenfassend ergeben sich damit **folgende Erkenntnisse** aus der durchgeführten Studie:

- Hinsichtlich der Tageslastprofile konnten **morgendliche Leistungsspitzen sowie niedrige Leistungsbedarfe nachts und mittags** identifiziert werden
- **Relevante Einflussgrößen** für den Betrieb der Wärmepumpen sind **neben der Außentemperatur die Dimensionierung der Wärmepumpe sowie der Gebäudetyp**. Sowohl durch gewollte als auch unbeabsichtigte überwiegend monovalente Dimensionierung werden **im Tagesmittel** selbst an kalten Tagen bei einem größeren Kollektiv oft nur **ca. 60 % der Nennleistung** erreicht.

2.1 Hintergrund

Für den Netzentwicklungsplan (NEP) und weitere Planungsprozesse bei Netzbetreibern werden Wärmepumpen-Lastzeitreihen benötigt. Im Anwendungsfall von dezentralen Wärmepumpen ist dabei der thermische Verbrauch der Gebäude maßgeblich für den Netzbezug. Der Einsatz von Heizstäben, die bei Luft-/Wasser-Wärmepumpen üblicherweise installiert sind und bei niedrigen Außentemperaturen zugeschaltet werden können, stellt eine weitere Herausforderung für die Bestimmung der elektrischen Last dar.

Für Netzplanungsaufgaben ist die zeitliche Verteilung des Strombezugs von Wärmepumpen und dessen Abhängigkeit von äußeren Einflussfaktoren wichtig. Das typische Verfahren hierfür ist die Verwendung von außentemperaturabhängigen Standardlastprofilen. Durch den Hochlauf an Wärmepumpen in den letzten Jahren bietet sich die Möglichkeit, Betriebserfahrungen aus mehreren Jahren zu nutzen, um diese Tageslastprofile zu überarbeiten. Unter Verwendung der Messdaten von Wärmepumpen hinsichtlich ihres Wärme- und Strombedarfs werden in dieser Studie neue Tageslastprofile entwickelt und aufbereitet, s. Kap. 3 und 4. Im Rahmen dieser Studie wird nur der Außentemperatur-geführte Betrieb simuliert, d. h. potenziell flexibles Verhalten als Reaktion auf Strommarktpreise oder dynamische Netzentgelte bleibt unberücksichtigt.

Da künftig mehr Kunden ihren Energieverbrauch flexibel an Strompreise, die Verfügbarkeit erneuerbarer Energien und die Netzkapazität anpassen werden, sind zusätzlich zu rein wärmegeführten Profilen Analysen nötig, wie sich der Anteil solcher flexibel betriebenen Anlagen im Zeitverlauf entwickelt. Die vorliegende Studie liefert dazu in Kap. 5 eine erste Einschätzung: Sie beschreibt den Übergang vom heutigen wärmegeführten Betrieb hin zu einer stärkeren Reaktion auf schwankende Marktpreise und/oder dynamische Netzentgelte seitens Wärmepumpen.

2.2 Vorgehensweise der Studie

Das Vorgehen in der Studie ist zusammenfassend in Abbildung 1 dargestellt.

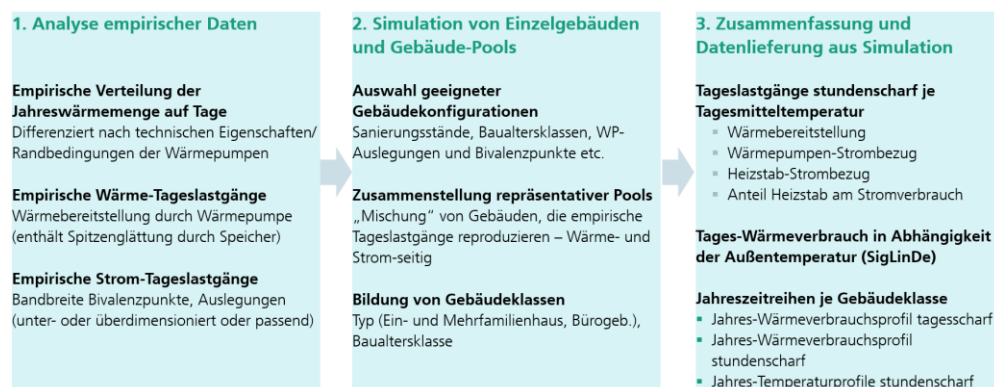


Abbildung 1: Methodisches Vorgehen und wesentliche (Zwischen-)Ergebnisse

Zu Beginn erfolgt eine Analyse der einzelnen Datensätze, um die an unterschiedlichen Standorten und damit unterschiedlichen Wetterrandbedingungen erhobenen Datensätze synchronisieren zu können, s. Kap. 3. Für die Studie wird ein großer Satz von Betriebsdaten von Wärmepumpenanlagen des Herstellers Stiebel-Eltron verwendet. Zur Absicherung der Ergebnisse dieser Daten, die sich rein auf die zum Betrieb benötigten, im System verbaute Sensorik der installierten Wärmepumpen stützt, wird ein Messdatensatz aus dem wissenschaftlichen Monitoringprojekt „WPQS im Bestand“ bestehend aus 52 Luft-Wasser-Wärmepumpen (LW-WP) sowie 14 Sole-Wasser-Wärmepumpen (SW-WP) genutzt.

Zur Bewertung von Wärmepumpen ist die Abhängigkeit von Wärmeleistung und notwendigem Stromeinsatz (und somit dem Coefficient of Performance (COP)) von Quellen- und Senkentemperaturen entscheidend, bezüglich Steuerung die Aspekte Teil- und Volllastbetrieb in Verbindung mit der Speicherbewirtschaftung sowie der notwendige Heizstabeinsatz. Speziell für den Heizstabeinsatz ist die Auslegung der Wärmepumpe in Bezug zum Wärmebedarf des Gebäudes wichtig. Zur Identifizierung dieser Auslegung wurden vergleichende Untersuchungen von Wärme- und elektrischen Leistungen im Bezug zum normativen Prüfpunkt A-7/W55 (Außentemperatur $-7\text{ }^{\circ}\text{C}$, Vorlauftemperatur $+55\text{ }^{\circ}\text{C}$) durchgeführt.

Die Messdaten-basierten Erkenntnisse werden anschließend zur Parametrierung und Validierung der Modellbildung in Kap. 4 herangezogen, um auch Tagesmitteltemperaturen unter $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ bewerten zu können. Für die Simulationen wird die Simulationsumgebung TRNSYS (dynamisches Gebäudemodell zur Bestimmung des Wärmebedarfs) für die dynamische Abbildung der Wärmelast des Gebäudes und das IEE-Modell microSCOPE (Anlageneinsatz- und Optimierungsmodell) für die Abbildung des Anlagenbetriebs verwendet. Bezüglich der Gebäudekonfigurationen werden verschiedene Gebäudetypen (Gebäudegröße, Baualter, Sanierungsstand, Nutzungstyp) mit unterschiedlichen Effizienzstandards umgesetzt und mit unterschiedlichen Nutzungsverhalten und stochastischen Trinkwasserprofilen kombiniert. Bei der Anlagenmodellierung werden Luft-Wasser-Wärmepumpen (LW-WP) abgebildet. Für alle Gebäudevarianten werden vier unterschiedliche Bivalenzpunkte umgesetzt ($-2\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-7\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-9\text{ }^{\circ}\text{C}$ und $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$), die anhand der Messdatenauswertung abgeleitet wurden. Im Hinblick auf den regelbasierten Betrieb werden Jahressimulationen auf ¼-Stunden-Basis für das Wetterjahr 2012 für die Standorte München, Kassel und Hamburg durchgeführt. Im Fall des Standorts München weist der Wetterdatensatz über einen Betrachtungszeitraum von mehreren Tagen Tagesmitteltemperaturen von etwa $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$ auf. Mithilfe der erstellten unterschiedlichen Modelle werden technologiespezifisch stochastisch verteilte Simulationen durchgeführt. Temperaturabhängige, stündliche synthetische Tageslastprofile werden aufbauend auf den Simulationsmodellen in Abhängigkeit der zentralen Einflussparameter erstellt, insbesondere in Abhängigkeit der Außentemperatur. Zusätzlich wird eine Auswertung des Tageswärmeverbrauchs in Abhängigkeit der Außentemperatur durchgeführt.

2.3

Struktur der Studie

Die Untersuchungen in der Studie bauen aufeinander auf und sind entsprechend der Kapitel strukturiert.

- Eingangs werden die allgemeinen Zusammenhänge der Auslegung von Wärmepumpen und des Betriebs in der Praxis und wie dieser auf die Tageslastprofile wirkt eingegangen, s. Kap. 3.1.
- Die vorhandenen Messdaten und ihre Restriktionen für die Auswertung werden erläutert, s. Kap. 3.1.

- Die Messdaten für Luft-Wasser-Wärmepumpen im Ein- und Zweifamilienhaus werden ausgewertet sowohl hinsichtlich der Bandbreite von Einzelanlagen als auch bezüglich des Mittelwerts des Anlagenpools, s. Kap. 3.2 und 3.3.
- Die Simulationsmodelle (inkl. Bandbreiten und Gewichtung für Wärmepumpenauslegungen, Nutzerverhalten, ...) für die Extrapolation für den Bereich bis -12 °C werden erläutert und für Luft-Wärmepumpen evaluiert, s. Kap. 4.2 und 4.3.
- Die Mess- und Simulationsdaten werden ausgewertet hinsichtlich Tages- und Jahreslastprofile. Für Mehrfamilienhäuser und Bürogebäude werden in Ermangelung von ausreichenden Messdaten nur Simulationen durchgeführt, s. Kap. 4.3.3 und 4.3.4.
- Abschließend werden Rahmenbedingungen für einen möglichen zukünftigen flexiblen Betrieb durch Strommarktsignale (Erhöhung der Netzbelastung) und dynamische Netzentgelte (Reduktion der Netzbelastung) analysiert, s. Kap. 5.

2.4

Verwendeter Datenpool

Um die Aufgabe der messdatenbasierten Bestimmung von Tageslastgängen zu bearbeiten, werden in der Studie zwei grundsätzlich unterschiedliche Datensätze verwendet. Zum einen wird ein Datensatz von Wärmepumpen der Fa. Stiebel-Eltron, die mit einem Kommunikationsmodul zur Datenübertragung ausgestattet sind, betrachtet. Hierzu wurde dem Fraunhofer IEE der komplette Betriebsdatenpool mit weltweit mehr als 26.000 Anlagen, davon mehr als 12.000 Anlagen in Deutschland, von der Fa. Stiebel-Eltron zur Verfügung gestellt. Darüber hinaus nutzt das Fraunhofer ISE einen Messdatensatz aus dem Forschungsprojekt WPQS im Bestand. Hierbei handelt es sich insgesamt um 66 Wärmepumpenanlagen, davon 52 Luft-Wasser-WP und 14 Erdwärmepumpen. Eine Zusammenfassung der Datenpools zeigt Tabelle 1.

Tabelle 1: Charakteristik der Betriebs- bzw. Messdatenpools

Betriebsdaten der Fa. Stiebel-Eltron	Messdaten aus dem Projekt WPQS
• Ca. 26.000 Anlagen, weltweit, davon ~ 12.000 in DE • Betriebszeitraum 1.1.2022-1.4.2024 • Information über Standort (PLZ, Straße, aber keine Hausnummer), keine Info über Auslegungsleistung • Betriebsdaten werden Ereignisorientiert übermittelt • Datenpunkte: Verdichterdrehzahl, thermische und elektrische Energien getrennt nach Warmwasser und Heizen (Tageszähler), Außentemperaturen, Vorlauftemperaturen, Betriebsstatus, Laufzeit elektrische Nachheizung, etc.	• 66 Anlagen von 12 Herstellern • Unterschiedlich sanierte Bestandsgebäude (Baujahr 1826-2009); überwiegend Einfamilienhäuser; deutschlandweit verteilt • Maximaler Messzeitraum: 01.01.2020 - 31.07.2024 • Messdaten mit einer Zeitauflösung von 30 bis 60 Sekunden • Datenpunkte: Elektrische Verbraucher separat mit Elektrozählern für Wärmequellenantrieb, Verdichter, Steuerung, Elektroheizstab, Speicherladepumpe(n), Heizkreis- und Zirkulationspumpen sowie Pumpen von Frischwasserstationen; Thermische Bilanzierung mit Wärmemengenzählern für Wärmequelle (bei SW-WP), Wärmebereitstellung nach der Wärmepumpe (Aufteilung Betriebsmodi Raumheizung und Trinkwassererwärmung) sowie nach den Speichern; Außenlufttemperatur

Bei den seitens der Fa. Stiebel-Eltron zur Verfügung gestellten Betriebsdaten handelt es sich um alle installierten Anlagen, die mit einem Kommunikationsmodul (ISG) ausgestattet sind, über welches laufend Betriebsdaten zum Server von Stiebel-Eltron übermittelt werden. Abhängig vom Kommunikationsmodul wurden von einer Wärmepumpenanlage unterschiedlich viele Datenpunkte mitgeschrieben und übermittelt.

Für alle installierten Wärmepumpen gilt, dass keine bzw. nur rudimentäre Informationen über die versorgten Gebäude vorliegen, somit also keine Bewertung des Betriebsverhaltens hinsichtlich der Normauslegung der Heizlast möglich war. Bei der Sichtung des Datenpools wurde zudem ersichtlich, dass nicht bei allen Geräten alle vorgesehenen Datenpunkte verfügbar waren, speziell Leistungswerte oder Statusmeldungen waren vereinzelt nicht vorhanden. Darüber hinaus gab es vereinzelt Anlagen, bei denen über bestimmte Zeiträume keine Betriebsdaten vorhanden waren oder Werte unplausibel erschienen. Weiterhin war die Stammdatentabelle lückenhaft, d. h. nicht immer war die genaue Typzuordnung oder die regionale Verortung der Anlagen möglich.

Die Verteilung der betrachteten konventionellen Luft-Wasser-Wärmepumpen der Fa. Stiebel-Eltron in Deutschland zeigt Abbildung 2.

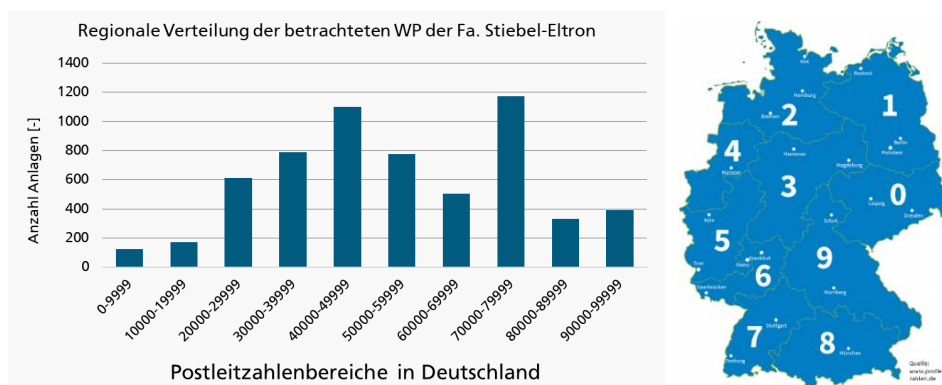


Abbildung 2: Regionale Verteilung der Anlagen der Fa. Stiebel-Eltron getrennt nach Postleitzahlenbereichen.

Die sich aus dieser Verteilung ergebende Verteilung der ortsbezogenen Auslegungstemperaturen zeigt Abbildung 3. Zu erkennen ist, dass im deutschlandweiten Anlagenpool nur verhältnismäßig wenige Anlagen Auslegungstemperaturen von unter $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$ haben bzw. in Gebieten liegen, in denen nach Branchenangaben¹ eine Auslegungstemperatur unter $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$ empfohlen wird – ca. 20 % der etwa 6.000 Anlagen mit bekannter PLZ, d. h. ca. 1200.

¹ <https://www.waermepumpe.de/werkzeuge/klimakarte/>

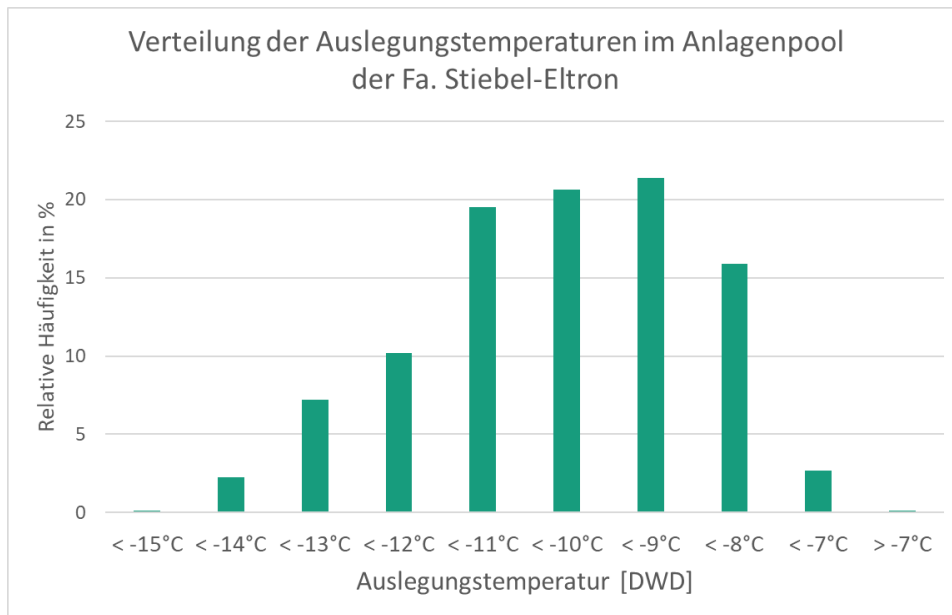


Abbildung 3: Häufigkeitsverteilung der standortbezogenen Auslegungstemperaturen der Anlagen aus dem Datenpool der Fa. Stiebel-Eltron.

Für das Analysieren der Effekte des Vollastbetriebs und damit insbesondere des Heizstabbetriebs stellt der umfangreiche Datensatz der Fa. Stiebel-Eltron mit mehr als 12.000 Anlagen verschiedener Wärmepumpentypen eine gute Grundlage dar. Die Charakteristik des Datensatzes erfordert aber die Anwendung von modellhaften sowie statistischen Methoden zur Erarbeitung von Tages- und Jahresprofilen für Wärmepumpenkollektive, bei denen die Betriebs- und Systemrandbedingungen die Variablen darstellen:

- Für die in einer Rohfassung vorliegenden Betriebsdaten erfolgen Plausibilitätskontrollen, ein Handling von Datenlücken sowie die Anwendung von Routinen zur Synchronisierung der Zeitreihen im Hinblick auf die zeitliche Auflösung.
- Auf Basis der den Daten zugrundeliegenden Meta-Informationen zur Wärmepumpentechnologie und geografischen Lage (DSGVO-konform) sowie unter Verwendung von Cluster- und Korrelationsanalysen werden die Daten über die Definition der Auslegungstemperatur am jeweiligen Standort der Anlage auf eine einheitliche Wettercharakteristik (Definition ähnlicher Tage) aggregiert, um Tagesprofile bestimmen zu können.
- In den Messdaten finden sich nur eine begrenzte Anzahl sehr kalter Tage (Außentemperaturen kleiner -5 °C). Um tiefere Temperaturen abdecken zu können, müssen die Messdaten über Gebäudesimulation auf kältere Tage extrapoliert werden. Um die Netzlast der Wärmepumpen für Worst-Case-Szenarien (Auslegungsfall und kälter) abschätzen zu können, werden Modellfunktionen entwickelt, die aus den Betriebsdaten der einzelnen Wärmepumpen extrahiert werden.
- Für die Identifikation von zentralen Zusammenhängen (Gebäudetyp, Heizlast, Wärmepumpentyp, Standort) ist eine gebäudescharfe Zuordnung der Betriebszeiten der Stiebel-Eltron-Daten erforderlich. Hierzu werden Gebäude- und Nutzerdaten aus dem Datenpool des Fraunhofer IEE verwendet, die mit den Betriebsdaten verschnitten werden.

Die Datensätze des Monitoringprojektes WPQS des Fraunhofer ISE umfassen Wärmepumpenanlagen unterschiedlichen Baujahres (2005 – 2023), Anlagendesigns, Gebäudestandards und geografischer Lage. Für viele dieser Anlagen liegen die Stammdaten zu den Anlagen vor – von Daten zur Wärmepumpenleistung und deren Regelbarkeit (fixed-speed vs. Inverter vs. mehrstufige Anlagen) über das Systemdesign (Speicher, zusätzlich Wärmeerzeuger, Wärmübergabesysteme, u.a.) bis hin zum Gebäude. Hiermit können die Messdaten mit den jeweiligen Randbedingungen verschnitten werden. Dies ermöglicht, Zusammenhänge zwischen den Einsatzbedingungen, der Auslegung und den Betriebskenndaten aufzuzeigen und die Messdaten u.a. hinsichtlich folgender Aspekte auszuwerten:

Einleitung

- Außenlufttemperaturabhängige tägliche Auslastung der Wärmepumpen
- Muster des Wärmepumpenbetriebes im Tagesgang
- Einsatzbedingungen des Heizstabes
- Clusterung nach unterschiedlichen Charakteristika der Wärmepumpen (insbesondere Art der Wärmequelle und Möglichkeit der Leistungsregelung) und weitere Anlagen- und Gebäudekenngrößen

3.1

Betrachtung von Einzelanlagen

Zur Entwicklung einer Charakteristik für Wärmepumpenkollektive ist ein detailliertes Verständnis der Betriebsweisen einzelner Wärmepumpensysteme notwendig. Hierzu zählt die Identifikation von Gemeinsamkeiten sowie die Variationsbreite unterschiedlichen Verhaltens. In Abbildung 4 ist beispielhaft für Anlagen aus dem Stiebel-Eltron-Datenpool die Wärmeleistung einer WPL20A-Anlage in Abhängigkeit der Außentemperatur auf Basis von 15-Minuten-Mittelwerten dargestellt. Zu erkennen ist ein signifikantes Wärmeleistungsprofil, an dem das Abfallen der Wärmeleistung bei niedrigen Außentemperaturen sowie der Teillastbetrieb bei höheren Außentemperaturen (bei der dargestellten Anlage bei Temperaturen oberhalb von ca. 3 °C treten trotz besserem COP praktisch keine Leistungswerte oberhalb von ca. 80 % der Auslegungsleistung auf), d. h. eine regelbasierte Leistungsbegrenzung, umgesetzt ist. Die Punkte, ab denen die Leistungen jeweils abfallen sowie die Modulationsbreite unterscheiden sich jedoch bei allen betrachteten Wärmepumpen.

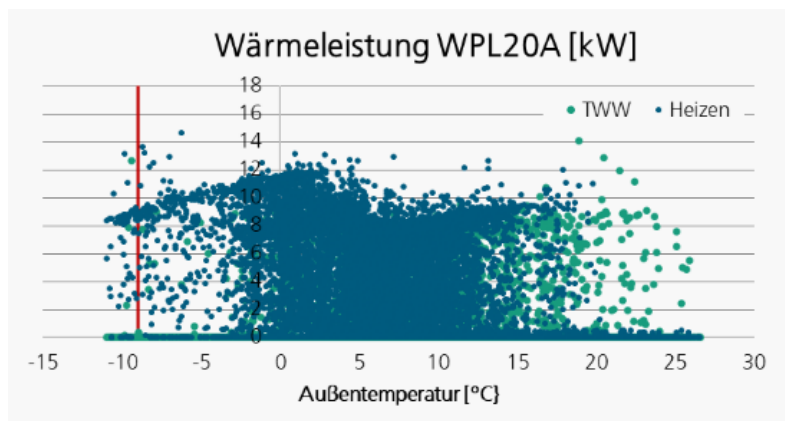
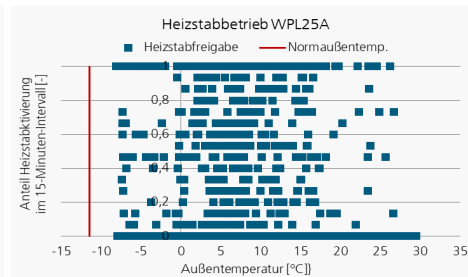
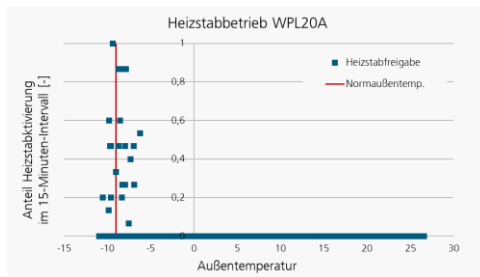


Abbildung 4: 15-Minuten-Mittelwerte der thermischen Leistung einer Stiebel-Eltron Wärmepumpe des Typs WPL20 A, Mildstedt, T-Auslegung: -9 °C

Ergänzend zu weiteren Untersuchungen hinsichtlich Verdichterdrrehzahlen (die im Gegensatz zu Energiemengen relativ durchgängig und zeitlich hochaufgelöst verfügbar sind) und dem Taktverhalten, die je nach Wärmepumpentyp ein sehr unterschiedliches Verhalten aufweisen, nimmt das Heizstabverhalten für die vorliegende Studie eine zentrale Rolle ein. Diesbezüglich zeigt Abbildung 5 die Zuschaltung von Heizstäben beispielhaft für zwei Wärmepumpen (WPL20A und WPL25A). Die rechte der beiden dargestellten Anlagen weist Heizstabbetrieb über den kompletten Außentemperaturbereich auf, die linke Anlage nur sehr vereinzelt bei Temperaturen in der Nähe des Auslegungspunkts.



Betriebsverhalten von
Wärmepumpen

Abbildung 5: Exemplarische Darstellung des Betriebsverhaltens der Heizstäbe von zwei Wärmepumpen der Fa. Stiebel-Eltron.

Bei der Betrachtung der mittleren täglichen Wärmeleistung, also dem Wärmeverbrauch des Gebäudes, für identische Wärmepumpentypen, zeigt Abbildung 6, dass zum einen die Höhe der mittleren Leistung (z.B. bei 0 °C) unterschiedlich ist, zum anderen aber auch der Verlauf der Kurve unterhalb von 0 °C. Die Höhe der mittleren Leistung zeigt dabei die unterschiedlichen Wärmebedarfe der Gebäude und damit die passgenaue Dimensionierung auf, der Verlauf der Kurve unterhalb von 0 °C kann dagegen zwei Ursachen haben:

- Bei niedrigen Temperaturen ändert sich das Nutzverhalten durch z.B. niedrigere Raumtemperaturen in einzelnen Räumen oder auch ein verringertes Fenster-Lüftungsverhalten an kalten Tagen
- Eine Begrenzung der Wärmepumpenleistung bei kalten Außentemperaturen führt entweder zum Zuschalten der Heizstäbe oder zu einer kurzzeitig nicht erreichten Soll-Temperaturen im Gebäude

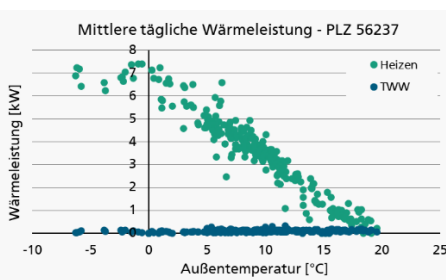
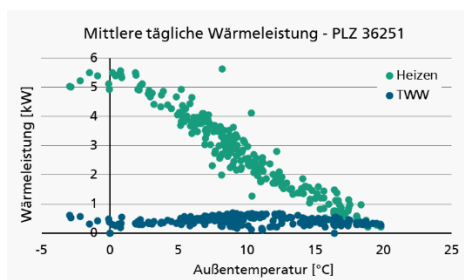


Abbildung 6: Beispielhafte Darstellung der mittleren täglichen Wärmeleistung für 2 WP-Anlagen des Typs WPL-A 07 HK 230 Premium.

Die gleichen Aspekte sind beim Vergleich der mittleren täglichen Wärme- und Stromleistungen in Abbildung 7 zu erkennen. Ein Abflachen der Wärmebedarfskurve bei kalten Temperaturen führt auch bei den Stromleistungen zu einem Abflachen der Leistungskurve, ein kontinuierlicher Anstieg spiegelt sich dagegen auch in der Stromleistung wider. Zusätzlich ist erkennbar, dass durch den sinkenden COP die Steigung der Stromleistungskurve mit sinkenden Temperaturen zunehmen.

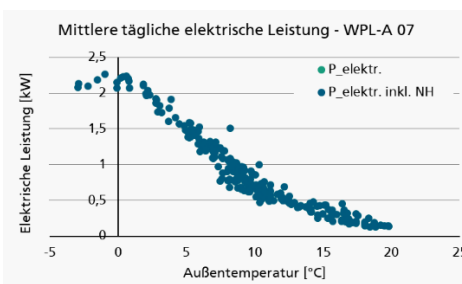
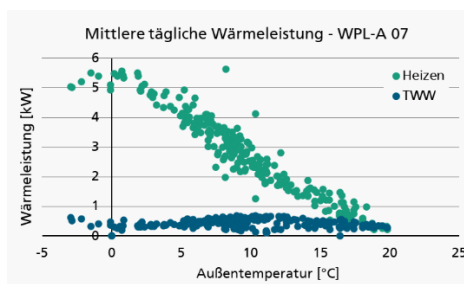


Abbildung 7: Beispielhafte Darstellung der mittleren Wärmeleistung und mittleren elektrischen Leistung einer WPL-A 07 HK 230 Premium Anlage am Standort Bad Hersfeld (NH – Nachheizung mittels Heizstab)

Die Betrachtung des vollständigen Pools der betrachteten Stiebel-Eltron-Anlagen in Deutschland zeigt Abbildung 8.

Betriebsverhalten von
Wärmepumpen

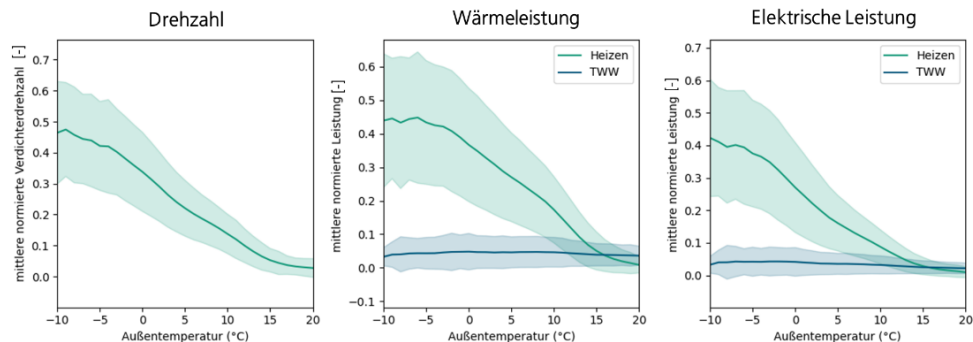


Abbildung 8: Mittleres Betriebsverhalten der Stiebel-Eltron-Anlagen (bezogen auf A-7/W55) in Abhängigkeit der Tagesmitteltemperatur.

3.2

Clustering des Anlagenpools

Wie die Betrachtung der Einzelanlagen zeigt, sind völlig unterschiedliche Verhalten der Anlagen möglich. Um dies bei der Entwicklung der Tages- und Jahreslastprofile zu berücksichtigen, erfolgte eine Clusterung des Anlagenpools der Stiebel-Eltron-Anlagen hinsichtlich verschiedener Merkmale. Aufgrund der Unkenntnis über die jeweiligen Gebäude und damit des Baualters, der Nutzfläche oder der Bewohnerzahl wurde die Clusterung rein auf Basis der Betriebsdaten und des Anlagentyps durchgeführt.

Um von den Betriebsdaten auf die energetische Qualität des Gebäudes sowie das Wärmeübertragungssystem zu schließen, erfolgte eine Analyse der Verteilung der Heizkurven im Anlagenpool der WPM-Systems-Anlagen. Abbildung 9 zeigt eine grafische Darstellung von Höhen und Steigungen der jeweiligen Heizkurven.

Heizkurven für WPM-Systems-Anlagen in Deutschland

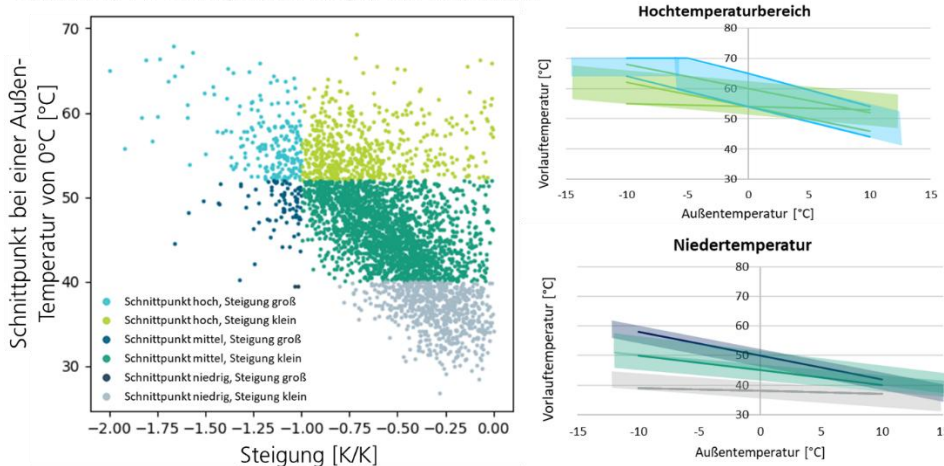


Abbildung 9: Verteilung der Heizkurven im Anlagenpool.

Zu erkennen ist, dass im Wärmepumpen-Pool sowohl Anlagen mit Vorlauftemperaturen bis 70 °C, die einem relativ schlechten Energieniveau zugeordnet werden können, sowie Anlagen mit sehr niedrigen Vorlauftemperaturen, die auf Fußbodenheizungen und damit Neubauten schließen lassen, vorkommen. Etwa die Hälfte der Anlagen lässt sich aber einem mittleren Niveau mit flacher Steigung, also z.B. Heizkörpersystemen im sanierten

Gebäudebestand, zuordnen. Neben der Heizungs-Vorlauftemperatur beeinflusst die Trinkwarmwasser-Vorlauftemperatur die Effizienz eines Wärmepumpensystems und insbesondere auch den Heizstabbetrieb. Eine Untersuchung der Vorlauftemperaturen zur Trinkwarmwasserbereitung zeigte, dass die Hälfte der Anlagen Vorlauftemperaturen zwischen 53 °C und 59 °C haben, aber insgesamt eine Bandbreite von ca. 42 °C (Frischwasserstationen) bis ca. 70 °C (TWW-Speicher) vorkommt.

Betriebsverhalten von
Wärmepumpen

Einen wesentlichen Einfluss auf das Betriebsverhalten, gerade auch bei niedrigen Außentemperaturen hat die Wahl des Bivalenzpunktes. Da weder der eigentliche Bivalenzpunkt noch die Heizlast des Gebäudes auf Basis der Heizlastberechnung (DIN EN 12831) bekannt sind, wurde analysiert, welches Verhältnis der Wärmepumpenleistung (aus dem Prüfpunkt A-7/W55) zur mittleren Heizlast des entsprechenden Gebäudes sich bei einer Tagesmitteltemperatur von -7 °C einstellt. In Abbildung 10 dargestellt ist die Häufigkeitsverteilung der auftretenden Verhältnisse. „Passende“ Anlagen werden in diesem Zusammenhang so definiert, dass die normierte Leistung zwischen 0,5 und 0,8 liegt, da verglichen mit dem Tagesmittel folgende Aspekte zusätzlich berücksichtigt werden müssen:

- Tagesgang: ca. 50 % höhere Leistung wird in der Morgenspitze abgerufen wird
- TWW inkl. Legionellenschaltung: An kalten Tagen < 10 % der Heizleistung
- Abtaubetrieb: Laufzeit an kalten Tagen ca. 10 %
- Höhere Leistungsanforderung im Auslegungspunkt verglichen mit -7 °C: im Mittel ca. 10 %
- Geringerer COP im Auslegungspunkt: ca. 10 %

Ein Faktor von ca. 0,6 und weniger würde diesbezüglich bedeuten, dass die Wärmepumpe auch an kalten Tagen und auch in den Morgenspitzen monovalent die notwendige Leistung bereitstellen kann.

Insgesamt zeigt sich weiterhin, dass die Verteilung der relativen Wärmeleistung bei -7 °C nur eine sehr geringe Abhängigkeit von der Auslegungstemperatur hat. Der Anlagenpool hat im Mittel eine Auslegungstemperatur von -10,5 °C während im kältesten simulativ untersuchten Standort – München – Auslegungstemperaturen von ca. -12 °C vorliegen. Die Auswertungen zur Dimensionierung deuten darauf hin, dass der mittlere Bivalenzpunkt in München nur geringfügig niedriger (weniger als 1 K) ist, als im Gesamtpool der deutschlandweit verteilten Anlagen.

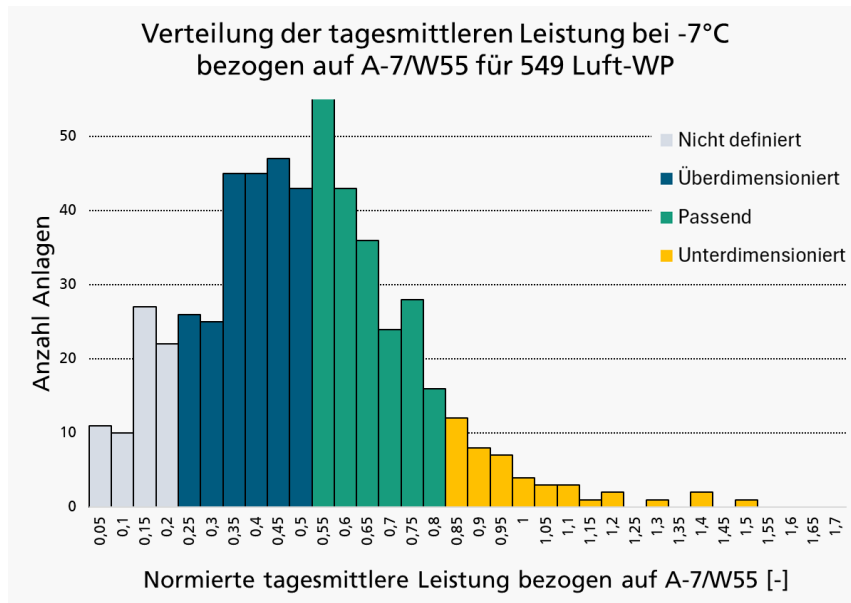


Abbildung 10: Verteilung der auf die Prüfleistung normierte Tagesmittelleistung bei -7 °C. „Unterdimensionierte“ Anlagen würden diesbezüglich hohe Bivalenzpunkte (-5 °C bis 0 °C) haben, „passende“ Anlagen können Bivalenzpunkte von -5 °C bis -10 °C (und damit teilweise auch monovalent) zugeordnet werden, „überdimensionierte“ Anlagen arbeiten überwiegend monovalent. „Nicht definierte“ Anlagen haben nicht erklärbar niedrige Wärmeleistungen.

Inwieweit die Verteilung der Bivalenzpunkte von der eigentlichen Auslegungstemperatur am Standort abhängt, zeigt Abbildung 11. Erkennbar ist, dass bei Anlagen mit Auslegungstemperaturen des Standorts der Wärmepumpe von unter -12 °C der Anteil der bezogen auf eine Tagesmittelttemperatur von -7 °C überdimensionierten Anlagen größer ist als bei den höheren Auslegungstemperaturen, d. h. bei niedrigeren Auslegungstemperaturen tendenziell niedrigere Bivalenzpunkte seitens der Installateure gewählt wurden. Allerdings sind die Unterschiede in den Verteilungen sehr gering, so dass im Anlagenpool von einem ähnlichen Betriebsverhalten der Wärmepumpen bei jeweils gleichen Außentemperaturen ausgegangen werden kann.

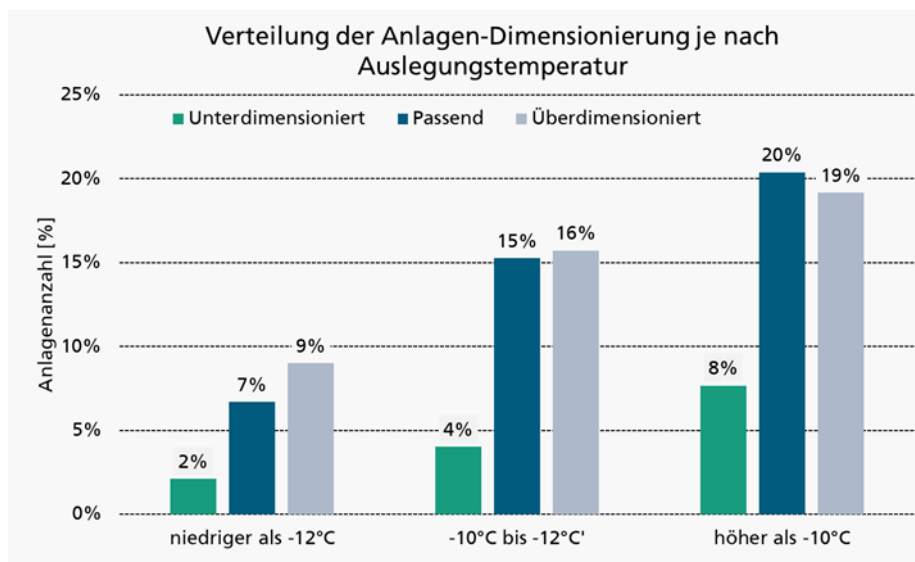


Abbildung 11: Verteilung der sich im Betrieb der Wärmepumpen-Anlagen einstellenden Dimensionierung in Abhängigkeit von der Auslegungstemperatur am Standort der Anlage

Eine Analyse der Verteilungen geclustert nach Heizkurven (also mutmaßlich des energetischen Gebäudestandards) ergab annähernd identische Verteilungen mit der höchsten Häufigkeit bei einer normierten Leistung von ebenfalls 0,5. Somit zeigen die im Mittel von Installateuren gewählten und sich dann im Betrieb einstellenden Bivalenzpunkte keine Korrelation zur Gebäudeeffizienz.

Betriebsverhalten von
Wärmepumpen

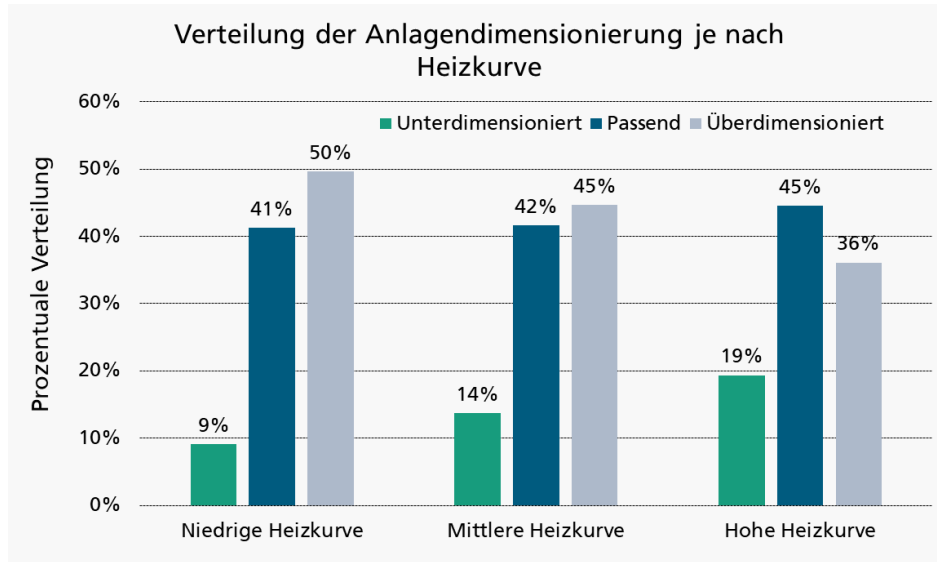


Abbildung 12: Verteilung der sich im Betrieb der Wärmepumpen-Anlagen einstellenden Dimensionierung in Abhängigkeit von der Heizkurve

Welche Dimensionierung sich zukünftig bei Bestandsgebäuden einstellen wird, ist schwierig vorherzusehen. Seitens der Hersteller ist die Auswirkung der Dimensionierung mit niedrigen Bivalenzpunkten und dem daraus resultierenden Taktungsverhalten bekannt. Es wird versucht, die Installateure dafür zu sensibilisieren.

Zusammenfassend lassen die hier gezeigten Analysen des Betriebsverhaltens sowie aus Vorarbeiten folgende Schlussfolgerungen zu:

- Neben der Außentemperatur sind die wichtigsten Einflussgrößen auf das Betriebsverhalten:
 - Dimensionierung / effektiver Bivalenzpunkt
 - Wärmepumpen-Typ (z.B. Wasser- oder Luft-Wasser-WP)
 - Gebäudealter & Sanierungszustand
 - Gebäudetyp (MFH oder EZFH, Gewerbe)
- Heizstabbetrieb nur an sehr kalten Tagen erkennbar – selbst für unterdimensionierte Anlagen und an kalten Tagen nur 20 % der maximalen täglichen Laufzeit
- Trinkwarmwassertemperaturen sehr unterschiedlich, haben aber kaum Korrelation zum Heizstabbetrieb
- Geringe Unterschiede Wochentag/Wochenende bei Wohnnutzung

3.3

Messwertbasierte Tageslastprofile

Zur Vorhersage des Strombedarfs von Wärmepumpen ist nicht nur die mittlere elektrische Leistung eines Tages, sondern auch der zeitliche Verlauf der elektrischen

Bezugsleistung über einen Tag wichtig. Der elektrische Tageslastgang wird dabei vor allem durch die tageszeitliche Verteilung der Wärmenachfrage für Heizen und Trinkwarmwasser bestimmt. Diesbezüglich zeigt Abbildung 13 einen über alle Temperaturen und alle verfügbaren Anlagen im Stiebel-Eltron-Datenpool gemittelten Wärmelastgang, der einen ausgeprägten Morgenpeak sowie einen deutlich geringeren Abendpeak aufweist.

Betriebsverhalten von
Wärmepumpen

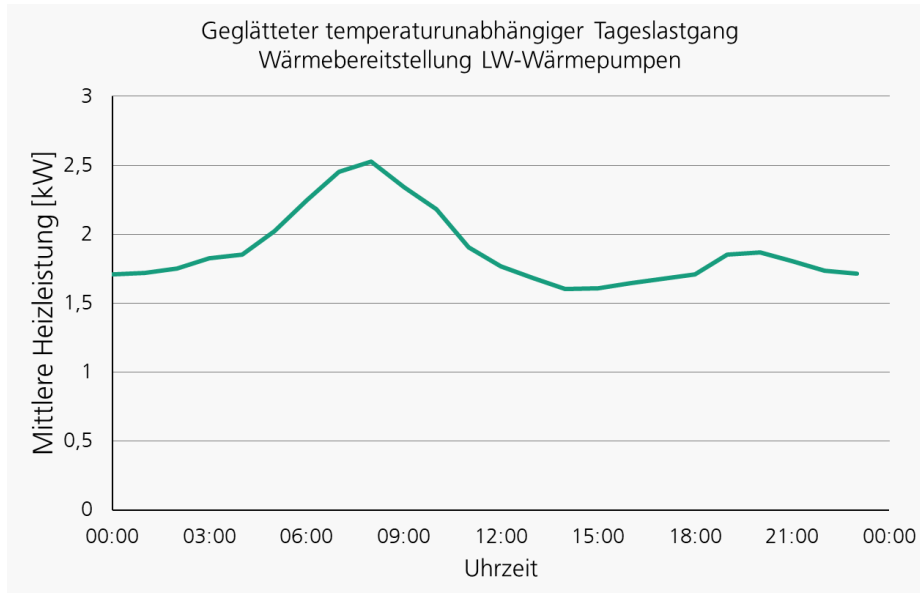
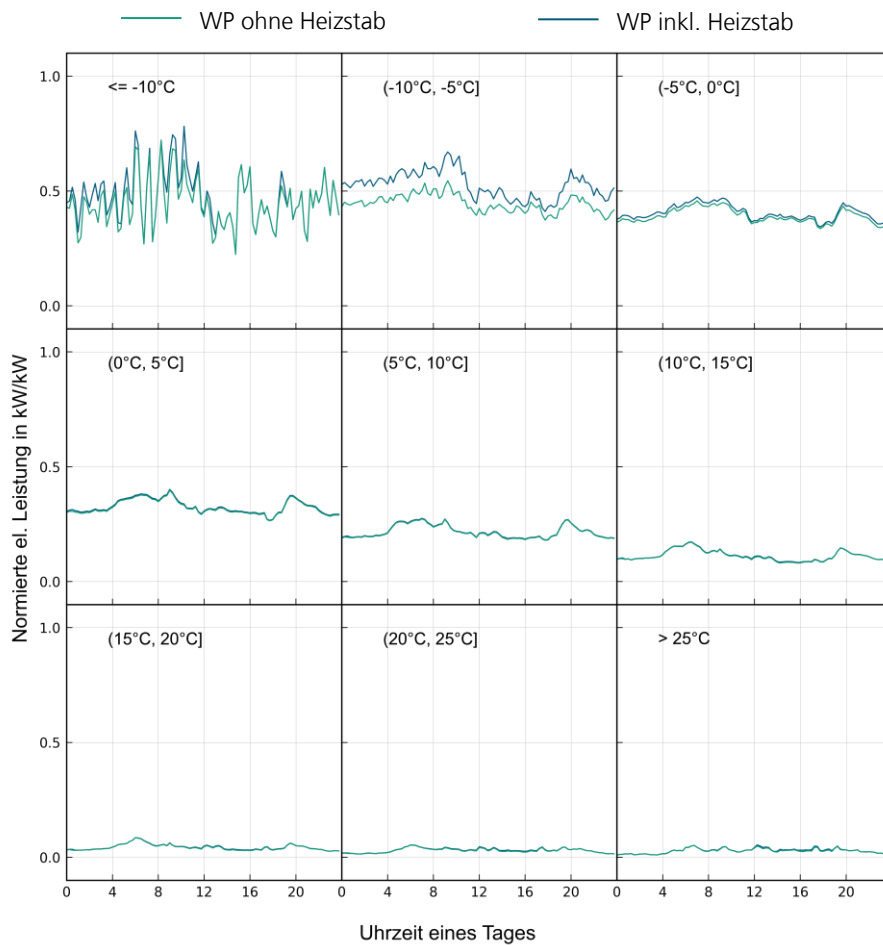


Abbildung 13: Gemittelter temperaturunabhängiger Tageslastgang für die Wärmebereitstellung für den Wärmepumpenpool der Stiebel-Eltron Anlagen.

Da für den Betrieb von Wärmepumpen die Außentemperatur die dominierende Einflussgröße ist, werden die zu verwendenden elektrischen Tageslastprofile typischerweise getrennt für unterschiedliche Tagesmitteltemperaturen dargestellt. Seitens des Monitoringprojekts WPQS konnten Tageslastgänge der elektrischen Leistung identifiziert werden. Abbildung 14 zeigt den Tagesgang der auf den Prüfpunkt A-7/W55 normierten elektrischen Leistung in Abhängigkeit verschiedener Temperaturklassen. Während der Heizperiode mit niedrigen Außenlufttemperaturen zeigt sich ein ausgeprägter tageszeitabhängiger Verlauf, der deutlich einen Leistungspeak morgens und abends sowie eine Nachabsenkung aufweist. Der Einfluss des Heizstabbetriebs auf die Tageslastprofile ist lediglich im Niedertemperaturbereich zu beobachten.



Betriebsverhalten von
Wärmepumpen

Abbildung 14: Normierte Tageslastprofile in verschiedenen Temperaturklassen auf Basis der Messdaten der 59 Wärmepumpenanlagen aus dem Projekt WPQS.

Die Gesamtheit der Wärmepumpen von Stiebel-Eltron zeigt wie in Abbildung 15 links dargestellt das gleiche deutlich ausgeprägte tageszeitabhängige Verhalten. Effekte, die zu diesem Verhalten führen dürften, sind insbesondere:

- Nachtabsenkungen und Teilbeheizungen einzelner Räume in der Nacht
- Unterschiedliches Lüftungsverhalten tagsüber und nachts, speziell im Bestand bei Fensterlüftung, erhöhte Lüftung in den Morgenstunden
- Niedrige Außenlufttemperaturen in den Nacht-/Morgenstunden
- Erhöhte Trinkwarmwasserzapfungen morgens und abends

Vor allem ist aber erkennbar, dass über den Gesamtpool der Anlagen eine Auswertung der Tageslastgänge nur bis -5°C (was einem Temperaturbereich von $-7,5^{\circ}\text{C}$ bis $-2,5^{\circ}\text{C}$ entspricht) möglich war. Als Benchmark für die Simulationen und dabei insbesondere die Verteilung von Bivalenzpunkten wurde daher der Tageslastgang bei -5°C und dabei insbesondere der Maximalwert im Morgenpeak herangezogen. Da die elektrische Leistung der Heizstäbe nicht als direkter Messwert vorlag, wurde diese mithilfe der mitprotokollierten Laufzeit der Heizstäbe sowie einer mittleren installierten Leistung der Heizstäbe (Annahme: WP mit 3,5 kW elektrischer Leistung bei A-7/W55 hat 6,5 kW Heizstabelleistung) ermittelt. Entsprechend Abbildung 16 ergibt sich für Heizen und Trinkwarmwasser ergänzend zu den direkt bestimmten Tageslastgängen in Abbildung 15 eine Schätzung des Tageslastgangs über den kompletten Außentemperaturbereich (gestrichelte Linien), die im Rahmen dieser Studie aber nicht weiterverwendet wurde.

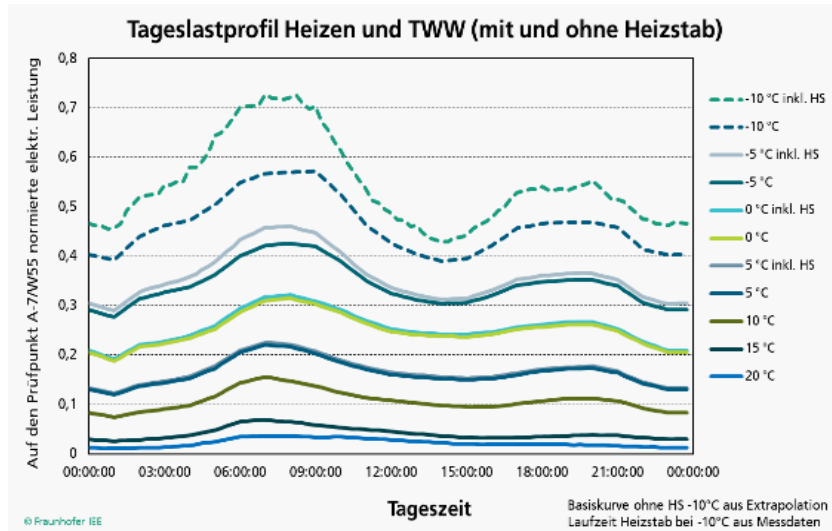


Abbildung 15: Tageslastprofile der auf den Prüfpunkt A-7/W55 normierten elektrischen Leistung des Gesamtpools der Stiebel-Eltron-Anlagen, links ohne Heizstab, rechts mit Extrapolation auf kalte Tage und Berücksichtigung der gemessenen Laufzeiten des Heizstabs an kalten Tagen

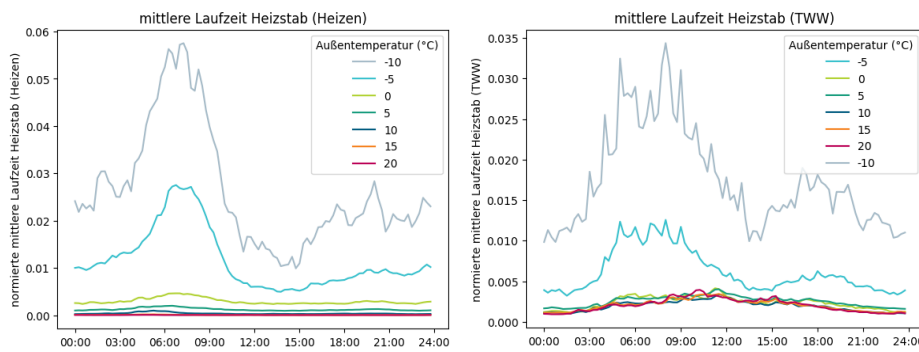


Abbildung 16: Tageslastprofil des Heizstabbetriebs mit Bezug zur Laufzeit, links Heizen, rechts Trinkwarmwassererwärmung.

Die elektrischen Tageslastgänge des Betriebsdatenpools getrennt für Heizen sowie Trinkwarmwasserbereitung zeigt Abbildung 17. Erkennbar ist wie erwartet ein sehr großer Unterschied in der Trinkwarmwasserbereitung tagsüber und nachts, bei einem insgesamt aber deutlich niedrigerem absoluten Niveau. Die Außentemperaturabhängigkeit ist hier zum einen durch veränderte COPs, zum anderen aber auch durch veränderte Kaltwassertemperaturen zu erklären.

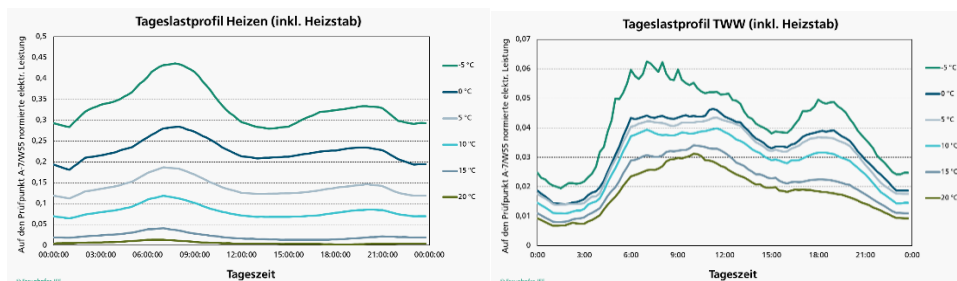


Abbildung 17: Tageslastprofile des Gesamtpools, getrennt für Heizen und TWW.

4.1

Notwendigkeit von Simulationsdaten zusätzlich zu Messdaten

Die Analysen des Messdatenpools von Luft-Wasser-Wärmepumpen in Ein- und Zweifamilienhäusern zeigten verschiedene Einschränkungen hinsichtlich der Analyse von Tages- und Jahreslastgängen:

- Es gibt nur eine eingeschränkte Datenverfügbarkeit speziell bei kalten Temperaturen.
- Durch Clustern des Anlagenpools nach bestimmten Charakteristika (z.B. Fußbodenheizung/Heizkörper, saniert/unsaniert, etc.) ergaben sich jeweils deutlich reduzierte Anzahlen an auswertbaren Anlagen und damit größere Unsicherheiten in den funktionalen Zusammenhängen.
- Die spezifischen Gebäudekenndaten lagen aufgrund von Datenschutzaspekten nicht vor.

Somit wurde in der Studie entschieden, dynamische Simulationsmodelle in Abhängigkeit relevanter Parameter zu nutzen. Dies gilt speziell für die Bewertung von Mehrfamilienhaus- und Büronutzungen mit nur unzureichenden Messdaten. Insbesondere aber auch für das zukünftige Flexibilitätspotential, für das keinerlei Mess- oder Betriebsdaten zur Verfügung stehen.

4.2

Simulationsmodelle

Für die Erstellung eines repräsentativen Gebäude- und Anlagenpools in München, Kassel und Hamburg wurden Einfamilienhäuser, kleine Mehrfamilienhäuser und kleine Bürogebäude als grundlegende Bautypen definiert. Neben der Festlegung von Gebäudehüllflächen und Nutzfläche wurde eine Differenzierung anhand ihres Baujahres, ihrer Sanierungshistorie sowie des Niveaus der thermischen Sanierung vorgenommen. Als zu sanierende Bauteile wurden Fassaden, Fenster, Dächer und erdberührende Bauteile gewählt.

4.2.1 Eingangsdaten und Annahmen

Hinsichtlich des Baujahrs werden die Gebäude wie in Tabelle 2 gezeigt in fünf Kategorien unterteilt. Die Sanierungshistorie zeigt die jeweiligen spezifischen Heizwärmebedarfe nach den Sanierungen, die Fassaden, Fenster, Dächer und erdberührende Bauteile betreffen. Zusätzlich werden die Gebäudetypen Ein- und Zweifamilienhaus (EZFH), kleines Mehrfamilienhaus mit bis zu 12 Wohneinheiten (KMFH) und Nichtwohngebäude (NWG) unterschieden.

Tabelle 2: Bandbreiten (Ober- und Untergrenze) spezifischer Heizwärmebedarfe der betrachteten Ein- und Zweifamilienhäuser in Abhängigkeit des Baujahrs und des angenommenen Sanierungsplans bis 2045.

Heizwärmebedarfe in kWh/m²a	Bis 1948	1949- 1978	1979- 2001	2002- 2015	Ab 2016
EZFH					
Un- bzw. teilsaniert	167,9	199,6	126,5	65,8	44,4
Vollsanert	60,4	50,8	62,5	61,5	42,0

KMFH					
Un- bzw. teilsaniert	146,8	105,9	100,6	49,9	38,4
Voll saniert	43,3	64,2	58,7	44,4	36,4
	Alle Baualtersklassen				
NWG					
Un- bzw. teilsaniert	85,8				
Voll saniert	46,7				

Simulationsmodelle

Darüber hinaus hat die Nutzung einen zentralen Einfluss auf den Betrieb der Wärmepumpen. Hierbei wird unterschieden in:

1. Nutzungsart Wohnen und Büro
2. Anzahl der Personen
3. Die Nutzungszeiten, unterschieden in Wochentag und Wochenenden
4. Die Raumtemperaturen während An- und Abwesenheiten, mögliche Absenkung der Raumtemperatur in der Nacht sowie Teilbeheizungen ungenutzter Räume (z.B. nicht über 18 Grad)
5. Das Lüftungsniveau einzelner Räume in Abhängigkeit der Nutzung und der Tageszeit
6. Stochastische Nutzungsprofile für Trinkwarmwasser (SynPRO Simulator des Fraunhofer ISE)

Aus den beschriebenen Variationsmöglichkeiten wurden auf Basis von Klimadatensätzen des Jahres 2012 Wärmebezugszeitreihen in 15-Minuten-Auflösung mithilfe der Simulationssoftware TRNSYS erstellt. Die dynamische Betrachtung ermöglicht es dabei auch beispielsweise, ein Auskühlen der Gebäudemasse über mehrere Tage oder den Einfluss von Lüftung / Nachtabenkung innerhalb eines Tages zu berücksichtigen. Um die Heterogenität des Gebäudebestands angemessen abzubilden, wurden die in Tabelle 3 dargestellten Profil-Anzahlen simuliert. Bei der Auswahl wurde berücksichtigt, wie verbreitet welche technischen Ausstattungen und weitere technische Parameter nach unserer erfahrungsbasierten Einschätzung sind. Dadurch sind in heterogeneren Gebäudeklassen teilweise etwas mehr Profile simuliert, in homogeneren etwas weniger.

Tabelle 3: Anzahl simulierter Profile nach Gebäudetyp und Baualtersklasse (BAK).

BAK Wohngebäude	EZFH	KMFH	BAK Nichtwohngebäude	NWG
vor 1948	156	156	alle BAK	72
1949-1978	156	156		
1979-2001	180	120		
2002-2015	120	180		
ab 2016	120	120		

Neben der Büronutzung finden sich im Bereich Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (GHD) noch vielfältige weitere Gebäudetypen, die im Rahmen ihrer kompletten Bandbreite im Rahmen dieser Kurzstudie nicht abgedeckt werden konnten. Bürogebäuden wurden als Stellvertreter dieser Klasse ausgewählt, da ein großer Anteil der GHD-Gebäude als stark oder teilweise büroähnlich eingeschätzt werden kann und alle anderen Gebäudetypen sehr Nutzer-spezifische und damit schwierig vorhersagbare Profile haben. Als Datengrundlage wurden dabei die erhobenen Daten zu Anzahlen und beheizten/gekühlten Flächen des IWU Darmstadt im Projekt EnoB:dataNWG genutzt und weiter

ausgewertet¹. Tabelle 4 fasst unsere Einschätzung zusammen; wir folgen bei der Klassifizierung dem IWU-Datensatz.

Simulationsmodelle

Tabelle 4: Einschätzung der Gebäude aus der NWG-Erhebung des IWU Darmstadt hinsichtlich der Ähnlichkeit zu Bürogebäuden.

Hauptgebäudefunktion	Einschätzung (Fh IEE)	
	büro-ähnlich	Anmerkung
Büro-, Verwaltungs- oder Amtsgebäude	ja	
Gebäude für Forschung und Hochschul-lehre	ja	
Gebäude für Gesundheit und Pflege	teils	<i>je nach spezieller Nutzung (z.B. Krankenhaus - eher wohnähnlich, Praxis - eher büroähnlich)</i>
Schule, Kindertagesstätte und sonstiges Betreuungsgebäude	ja	
Gebäude für Kultur und Freizeit	nein	<i>grundsätzlich ähnlich, aber deutlich andere Nutzungszeiten</i>
Sportgebäude	nein	
Beherbergungs- oder Unterbringungsgebäude, Gastronomie- oder Verpflegungsgebäude	teils	<i>mehr Wochenend- und Abend-Betrieb, tlw. ähnlich wie Wohngebäude</i>
Produktions-, Werkstatt-, Lager- oder Betriebsgebäude	nein	<i>eher dem Industrie- als dem GHD-Bereich zuzuordnen → werden herausgerechnet</i>
Handelsgebäude	teils	<i>zusätzlich samstags Betrieb</i>
Technikgebäude (Ver- und Entsorgung)	nein	
Verkehrsgebäude	nein	

Daraus ergeben sich die in Abbildung 18 dargestellten Anteile an der beheizten Fläche.

¹ S. <https://github.com/IWUGERMANY/Nichtwohngebäude-Typologie-Deutschland>

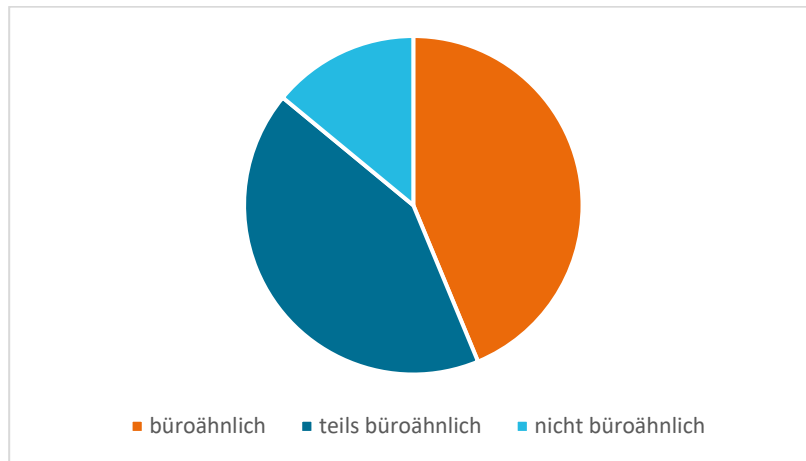


Abbildung 18: Zusammensetzung der beheizten/gekühlten Flächen im deutschen GHD-Sektor, gruppiert nach ihrer Ähnlichkeit zu Bürogebäuden.

4.2.2 Thermische Lastgänge

Im Folgenden sind beispielhafte Wärmelastgänge Heizen für die verschiedenen Nutzungsarten dargestellt. Abbildung 19 zeigt diesbezüglich am Beispiel eines Gebäudes der Baualterklasse 2002 Nutzungsprofile mit und ohne Nachtabsenkung für eine saniertes und ein unsaniertes Gebäude. Zu erkennen ist, dass Gebäude ohne Nachtabsenkung ein recht gleichmäßiges Verbrauchsprofil über den Tag haben, während die Gebäude mit Nachtabsenkung eine deutliche Morgenspitze aufweisen.

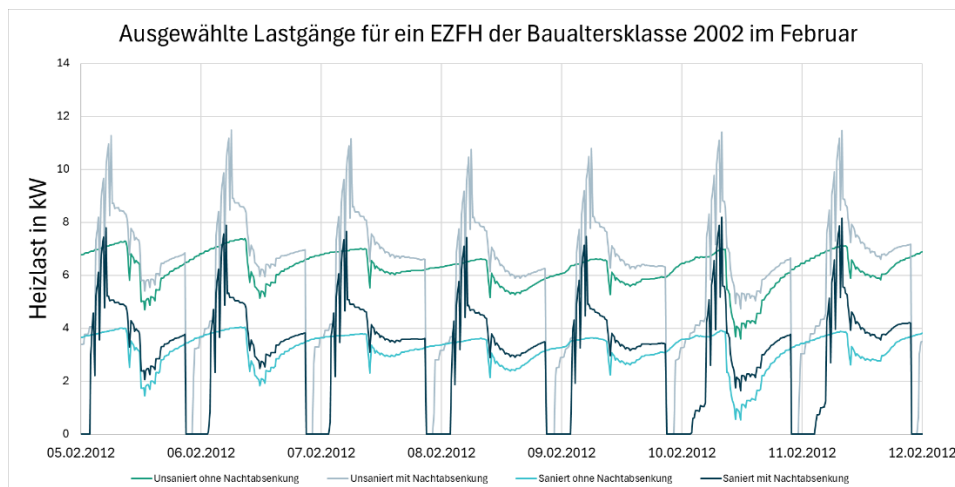


Abbildung 19: Ausgewählte simulierte Nutzenergieprofile Heizen für EZFH am Beispiel einer kalten Woche im Februar für ein Gebäude der Baualterklasse 2002 - 2015.

Abbildung 20 zeigt beispielhaft die Tageslastgänge für die gleiche Woche im Februar für eine kleines Mehrfamilienhaus der Baualterklasse 1948, hier mit den gleichen Nutzungsprofilen, die auch in Abbildung 19 zugrunde gelegt sind. Zu erkennen sind sehr ähnliche Profile, wobei zum einen die Aufheizpeaks aufgrund der Mittelung über die einzelnen Wohnungen deutlich geringer ausfallen und die Nachtabsenkung aufgrund der Baualterklasse im unsanierten Zustand zu einem nur sehr kurzen tatsächlichen Ausschalten der Heizung führt.

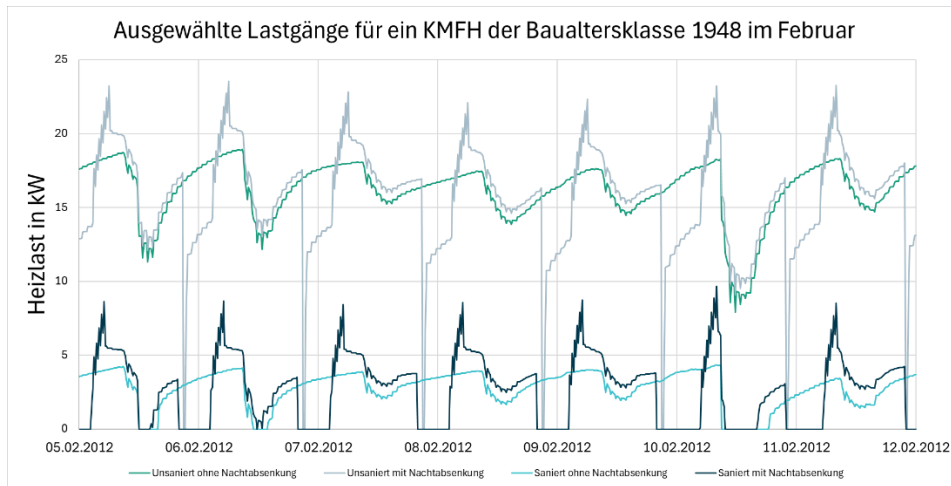


Abbildung 20: Ausgewählte simulierte Nutzenergieprofile Heizen für KMFH am Beispiel einer kalten Woche im Februar für ein Gebäude der Baualtersklasse vor 1948.

Abbildung 21 zeigt am Beispiel einer kalten Woche zwei Wärmelastprofile (einmal Fensterlüftung und einmal mechanische Lüftung mit Wärmerückgewinnung) für die Nutzungsart Büro, bei denen eine Nacht- sowie eine Wochenendabsenkung umgesetzt wurde. Erkennbar ist in den Profilen ein sehr ausgeprägter morgentlicher Aufheizpeak und sehr stark reduzierte thermische Lasten am Wochenende. Das Profil mit Wärmerückgewinnung hat insbesondere tagsüber deutlich geringere Lasten als das Fensterlüftungsprofil.

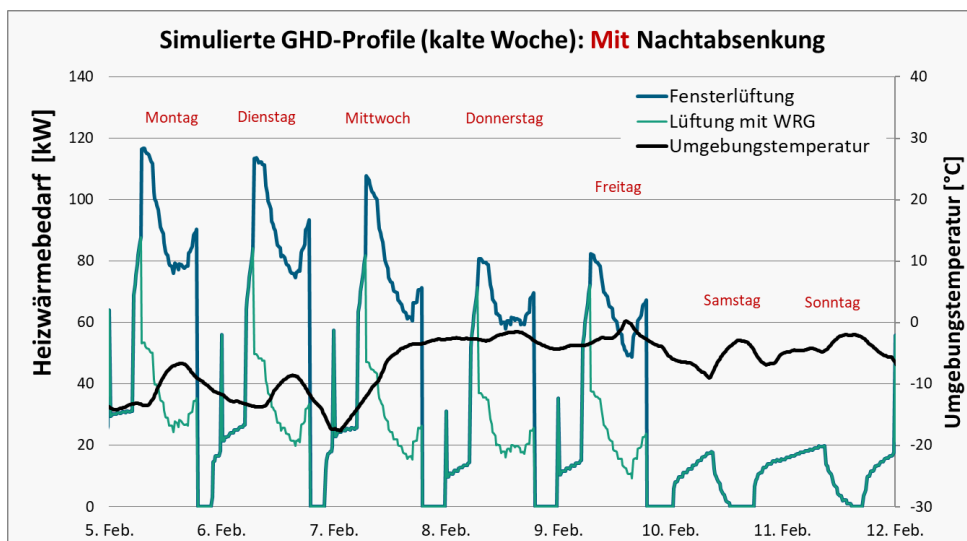
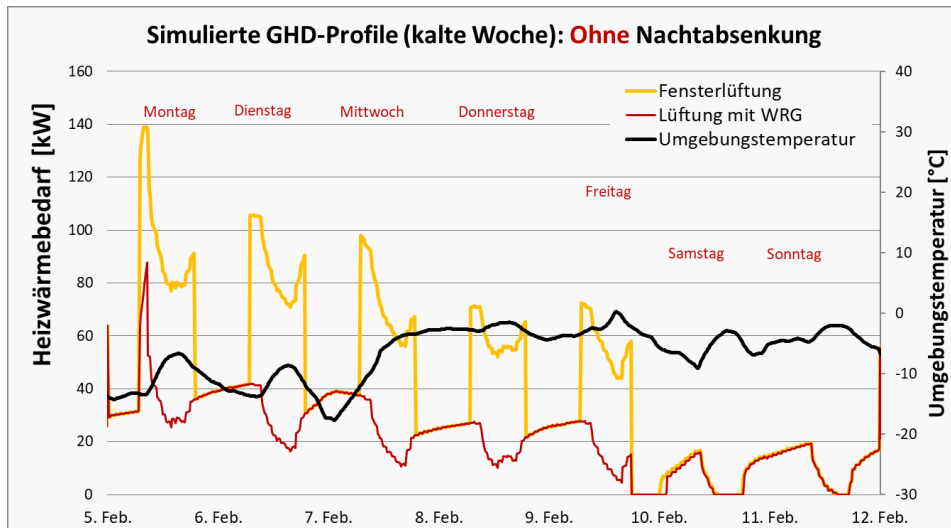


Abbildung 21: Simulierte Nutzenergieprofile Heizen unter Berücksichtigung von Nachtabsenkung.

Abbildung 22 zeigt ergänzend hierzu die gleichen Profile, allerdings wurde hier auf eine Nachtabsenkung verzichtet. Aufgrund der fehlenden Nachtabsenkung haben die Profile signifikante thermische Lasten in der Nacht, insbesondere zeigen diese Profile durch die umgesetzte Wochenendabsenkung einen signifikanten Leistungspeak am Montagmorgen, der sowohl bei dem Profil mit Fensterlüftung als auch dem mit maschineller Lüftung erkennbar ist.



Simulationsmodelle

Abbildung 22: Simulierte Nutzenergieprofile Heizen ohne Nachtab senkung.

Aufgrund der geringen Anzahl verbauter Wärmepumpen im Bereich GHD liegen keine detaillierten Kenntnisse über zukünftige Anteile von Gebäudetypen oder Nutzungsprofilen im Bereich GHD vor. Exemplarische Untersuchungen hierzu erfolgten beispielsweise im vom Fraunhofer ISE durchgeführten Projekt synGHD, in dem Wärme- und Stromprofile an einer kleinen Anzahl von Gebäude analysiert wurden. Hinsichtlich Büronutzung wurden im Projekt typische Tageslastgänge für die elektrische Gesamtlast erstellt. Erkennbar ist ein signifikanter Unterschied der Profile von Wochentag und Wochenende, der für die betrachteten Gebäude eine ausschließliche Wochentagsnutzung ergibt.

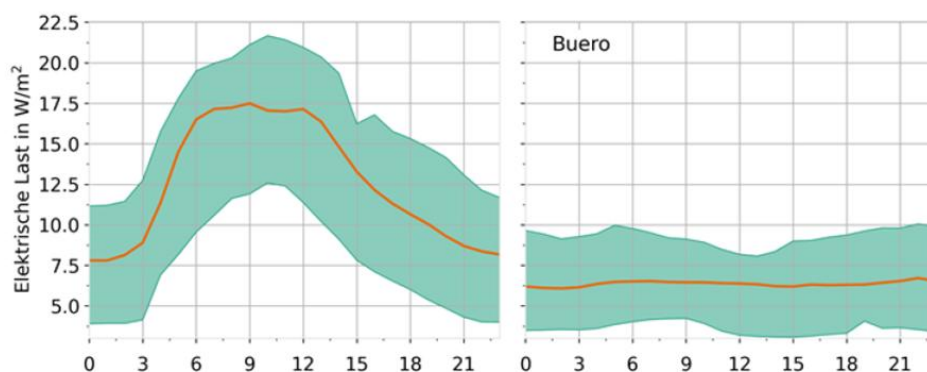
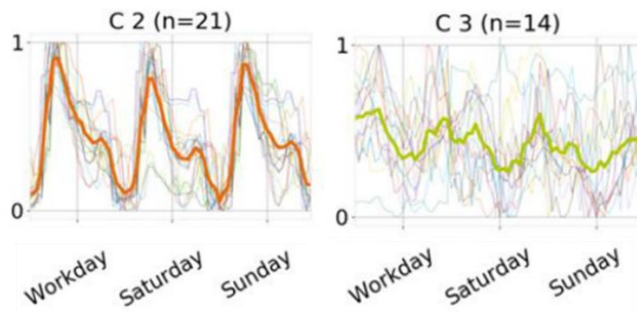


Abbildung 23: Tageslastgänge der elektrischen Last; links: Wochentag, rechts: Wochenende (Quelle: synGHD).

Thermisch Lastgänge für Büroanwendungen konnten im Projekt synGHD nicht erstellt werden, Clusteranalysen ordneten Büroanwendungen aber entsprechend Abbildung 24 in zwei verschiedenen Kategorien ein. Aufgrund der hohen Varianz der Profile innerhalb der jeweiligen Gruppe und die Zusammenfassung verschiedener Nutzungsarten lässt sich hieraus aber kein eindeutiges thermisches Profil entwickeln, weder was die Frage der Nachtab senkung noch die der Wochentag-Wochenend-Unterschiede angeht.



Cluster	Kategorie	Anzahl
C1	Bildung	51
	Sonstige	2
C2	Beherbergung	10
	Büro	4
	Hotel	4
C3	Bildung	7
	Büro	2
	Einzelhandel	2
C4	Hotel	7
	Einzelhandel	5
	Gesundheit	5
C5	Einzelhandel	9
	Bildung	3
	Öffentliche Gebäude	1

Simulationsmodelle

Abbildung 24: Ergebnis einer Clusteranalyse hinsichtlich thermischer Lastprofile mit der sich daraus ergebenden Einordnung von Büros.

Einen typischen thermischen Lastgang eines fernwärmeversorgten Büroneubaus in Hannover zeigt Abbildung 25. Erkennbar sind eine Nachtabenkung sowie deutlich reduzierte thermische Lasten am Wochenende, das Profil weist damit eine gute Übereinstimmung zu den Profilen in Abbildung 21 auf. Inwiefern aber eine Übertragung von Fernwärmeprofilen auf wärmepumpenversorgte Gebäude möglich ist, müssen zukünftige (messtechnische) Untersuchungen ergeben.

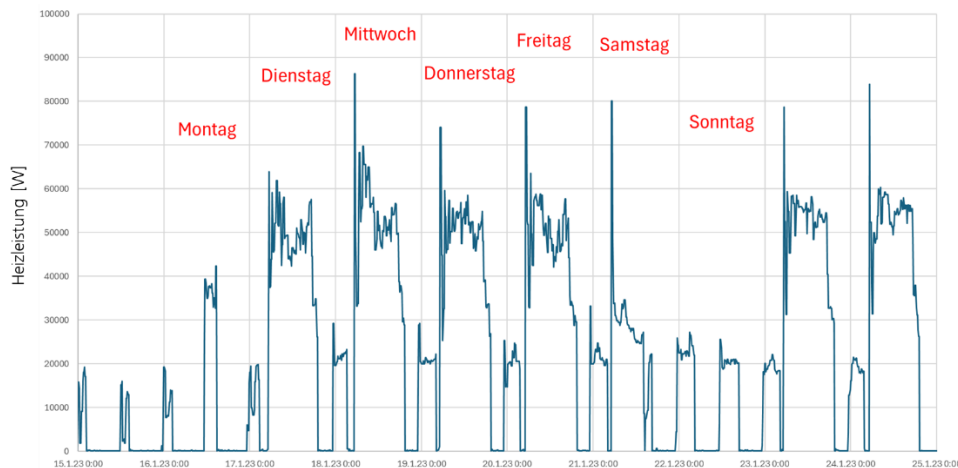


Abbildung 25: Beispielhafter thermischer Lastgang eines fernwärmeversorgten Büroneubaus in Hannover.

Aufgrund der geringen Datenmenge konnte im Projekt keine eindeutige Zusammensetzung eines zukünftigen Gebäudepools im Bereich der Nichtwohngebäude und dabei insbesondere der Büros bestimmt werden. Um der Variabilität verschiedener Nutzungen gerecht zu werden, wurde daher eine Gleichverteilung der verwendeten Profile angesetzt. Die sich zukünftig dann tatsächlich einstellenden Profile für Wärmepumpenversorgte Bürogebäude kann hierfür aber u.U. auch deutlich abweichen.

4.2.3 Modellierung Wärmepumpen-Betrieb

Für die Abbildung der Anlagentechnik und deren Regelung wurde das Fraunhofer IEE-Modell microSCOPE verwendet. Im Hinblick auf das Wärmeversorgungssystem erfolgt eine Unterteilung der Gebäude in Fußbodenheizungen und Heizkörpersystemen. Für Fußbodenheizungen werden niedrige Vorlauftemperaturen (bis 40 °C bei -12 °C Tagesmitteltemperatur) mit flacher Heizkurve angesetzt, bei den Heizkörpersystemen wurden Heizkurven in Abhängigkeit des Sanierungsstands gewählt. Im teilsanierten Gebäude (inkl. Heizkörperoptimierung) wurden Temperaturen von 55 °C implementiert.

Für die eigentliche Abbildung der Wärmepumpen wurden Herstellerkennlinien für Wärmeleistung, elektrischer Leistung und COP mit ihrem jeweiligen Teillastverhalten abgebildet. Für alle Gebäude wurden kleine Trinkwarmwasserspeicher mit 50 Liter pro Person vorgesehen, Systeme mit Heizkörpern haben zusätzlich noch Pufferspeicher mit einem Volumen von 30 Liter pro kW Wärmepumpenleistung. Elektrische Nachheizung ist sowohl für Trinkwarmwasser als auch für Gebäudeheizung möglich.

Es erfolgt eine Durchführung von Jahressimulationen auf ¼-Stunden-Basis für das historische Wetterjahr 2012, das Tagesmitteltemperaturen von etwa -12 °C am kältesten betrachteten Standort (München) über mehrere Tage (Auskühlen) als Extremfall aufwies. Insbesondere die kalte Phase Anfang Februar ist in diesem Wetterjahr sowohl auslegungsrelevant für die Verteilnetze als auch exemplarisch für die Wechselwirkungen mit dem Strommarkt. So wird das Jahr (unter anderen Wetterjahren) in Analysen des Netzentwicklungsplans der Übertragungsnetzbetreiber verwendet, weil es eine europaweit ausgeprägte Dunkelflaute hat und die Wechselwirkung zwischen Außentemperatur, wetterabhängiger EE-Erzeugung und Strompreisen aufweist. Somit sind die Ergebnisse mit anderen Zeitreihen für weitere Analysen konsistent einsetzbar.

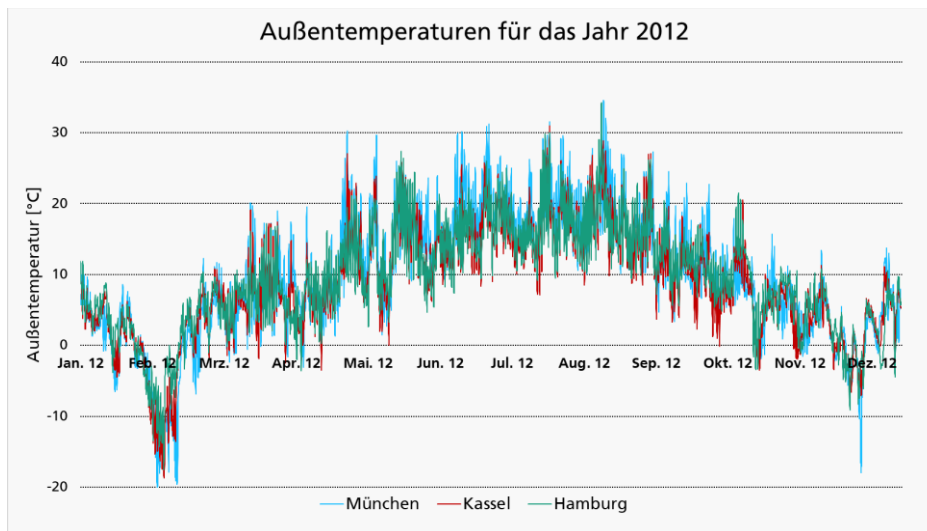
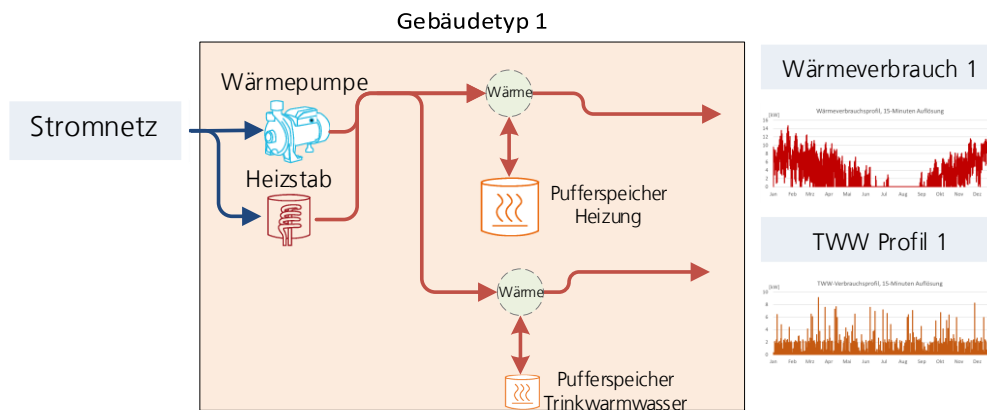


Abbildung 26: Außentemperaturen im Rahmen der Simulationsstudie für das historische Wetterjahr 2012 für die Standorte München, Kassel und Hamburg.

Die Modellierung des Anlagenpools erfolgte über die Simulation von Einzelgebäuden. Die Verteilung bzw. Gewichtung von Baualtersklassen inkl. Effizienzstandard, Auslegung, Nutzerverhalten innerhalb eines Wärmepumpenkollektivs wurde iterativ ermittelt, um Ergebnisse des aggregierten Betriebsverhaltens der Messdaten im Bereich von +20 °C bis -5 °C Tagesmitteltemperatur zu treffen.



Simulationsmodelle

Abbildung 27: Veranschaulichung der Simulationemethodik.

Konkret wurde folgendes Vorgehen für Luft-Wasser-WP in Ein- und Zweifamilienhäusern (EZFH), kleinen Mehrfamilienhäusern (KMFH) und Bürogebäuden, stellvertretend für Nichtwohngebäude (NWG) gewählt:

1. Validierung der Simulationsergebnisse mit Messdatenergebnissen für Luft-Wasser-WP in EZFH mit Gebäudemix aus hauptsächlich Bestandsgebäuden und geringen Anteilen Neubauten: Aufgrund der geringen Abhängigkeit der Tagesprofile des Anlagenpools von der lokalen Auslegungstemperatur eines Standorts erfolgte die Validierung der Modelle und insbesondere der Verteilung der Bivalententemperaturen auf den gemessenen Tageslastgang mit Fokus $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$, ohne weiter zwischen den Standorten der Messdaten-WP zu differenzieren. D. h. die Zusammensetzung des Gebäudepools wurde so eingestellt, dass die aggregierte, messdatenbasierte Tagesprofilkurve bei $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ durch den Gebäudepool reproduziert wurde.
2. Simulative Extrapolation der Tageslastgänge auf $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ und $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$ sowie die beiden weiteren Gebäudetypen MFH und NWG: Für die weiteren Gebäudetypen wurde unterstellt, dass ihre Auslegung etwas besser/genauer auf die Heizlast der Gebäude dimensioniert ist, weil bei größeren Anlagen von einer größeren Investition und damit verbunden einer besseren Planung plausibel erscheint.

4.3

Erstellung aggregierter Wärme- und Stromprofile

Um aus den Simulationsdaten die Profile zu generieren, die in der Toolkette der 4 ÜNB für den Netzentwicklungsplan genutzt werden können, sind mehrere Schritte notwendig (jeweils pro Gebäudegruppe):

1. Aggregation der Einzelprofile zu Jahreszeitreihen, downsampling auf stündliche Auflösung
2. Berechnung des Heizstabanteils (wärmeseitig) an der Raumwärme- und Trinkwarmwasserbereitstellung
3. Mittelung über jeweils alle Tagesprofile bei einer trägen Tagesmitteltemperatur, um für eine Außentemperatur typische Profile zu erzeugen
4. Normierung der Profile auf Tages- bzw. Jahressumme 1

5. Bestimmung des COP (getrennt nach Raumwärme und Trinkwarmwasser) als Quotient aus Wärmebereitstellung durch die Wärmepumpe und ihrem Strombezug und Auswertung, sortiert nach stündlicher Temperatur
6. Fit der Raumwärmebereitstellung als Funktion der Temperatur über eine Sigmoidfunktion mit linearem Anteil (SigLinDe)

Simulationsmodelle

Die Zerlegung der Zeitreihen in Jahres- und Tageszeitreihen wird vorgenommen, um beim AG die Erstellung synthetischer Zeitreihen für andere Jahres-Temperaturverläufe zu ermöglichen, mit Hilfe derer Studien für veränderte Wetter-Zeitreihen durchgeführt werden können, bspw. für Klimawandel-bedingte Änderungen oder auch hypothetische Extremsituationen. Im Folgenden werden einzelne Schritte der im Rahmen dieser Studie durchgeführten Auswertungen genauer erläutert.

4.3.1 Gebäudegruppen und Aggregation

Damit die Profile jeweils repräsentativ für ein Ensemble von Wärmepumpen sind, werden die Profile der Einzelgebäude aggregiert. Für die Wohngebäude (EZFH – Einfamilienhäuser und KMFH – kleine Mehrfamilienhäuser) erfolgt die Gruppierung nach Standort und nach Baualtersklasse. Für die Wohngebäude erfolgen die Auswertungen sowohl getrennt nach Raumwärme (RW) und Trinkwarmwasser (TWW) als auch in Summe, damit sie sowohl in der aktuellen Toolkette des AG nutzbar sind als auch in einer zukünftigen, nach RW und TWW differenzierten Toolkette.

Für die Bürogebäude (NWG – Nichtwohngebäude) hat sich im Laufe der Auswertungen herausgestellt, dass eine Differenzierung nach Standort – solange man die Tagesprofile bei einer festen Außentemperatur betrachtet – wenig Mehrwert bietet. Daher wurden diese Profile über alle Standorte aggregiert. Große Unterschiede bei NWG bestehen dagegen zwischen Werk- und Wochenend-Tagen, da diese Gebäude typischerweise nur an Werktagen genutzt werden und eine Wochenend-Temperaturabsenkung angenommen wird. Aus diesem Grund werden die Tagesprofile hier statt nach Standort nach Werktag und Wochenende differenziert. Darüber hinaus wurde die Annahme getroffen, dass es in NWG keinen nennenswerten TWW-Verbrauch gibt (bzw. dass TWW-Verbrauch anderweitig, z.B. direktelektrisch, gedeckt wird). Somit wird auch nicht in RW und TWW differenziert, sondern es gibt nur RW.

Die Auswertung der täglich benötigten Wärmemengen in Abhängigkeit der Außentemperaturen, Standorte und Baualtersklassen konnte teilweise weiter aggregiert werden, für Details s. Abschnitt 4.3.4.

Für die Simulationen aller Einzelgebäude wurden jeweils die Nachtabenkung (ja/nein und wenn ja, welches Zeitfenster), das Vorhandensein einer Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung (ja/nein), die Betriebszeiten der Lüftungsanlage, die energetische Qualität der Gebäudehülle (teilsaniert/vollsaniert) sowie die Anlagentechnik (Heizkörper/Fußbodenheizung) variiert. Für Wohngebäude wurden darüber hinaus stochastisch erzeugte TWW-Profile (aus dem SynPro-Lastprofilgenerator des Fh ISE) genutzt, wie in Abschnitt 4.2 beschrieben. Um daraus aggregierte Profile zu gewinnen, wird ein gewichtetes Mittel dieser Profile gebildet. Bei der Gewichtung spielen folgende Überlegungen eine Rolle:

- Mittlerer Bivalenzpunkt: Eine Auswertung der Simulationsdaten zeigt, dass im Mittel (bei hoher Streuung) der Bivalenzpunkt um 1/3 K höher wandert, wenn sich die Auslegungstemperatur um 1 K nach oben verschiebt (als Auslegungs-

temperaturen werden die veröffentlichten Werte des BWP genutzt¹). In München wird daher eine mittlere Bivalenztemperatur von -9,5 °C, in Kassel von -9,2 °C, und in Hamburg von -8,5 °C gewählt. Es wird weiter angenommen, dass die Auslegung der WP bei Nichtwohngebäuden stärker professionalisiert ist und daher etwas weniger Unter- und Überdimensionierung auftritt.

- **Neubau/Bestand:** Die Zusammensetzung von Baualtersklassen entspricht in etwa dem Mittel des deutschen Wohngebäudebestands. Für die WP-versorgten Bestandsgebäude wird mindestens ein teilsanierter Zustand der Gebäudehülle angenommen, z.B. durch Dachdämmung und Wärmeschutzverglasung in den Fenstern.
- **Anteil Nachtabenkung:** Durch die hohen Leistungen beim Wiederaufheizen ist eine Nachtabenkung für Gebäude mit Wärmepumpen nicht immer wirtschaftlich sinnvoll – eine höhere benötigte Leistung für die Wieder-Aufheizung bedeutet höhere Installationskosten für die höhere Leistung, die die Einsparungen im Betrieb u.U. aufwiegen. Daher gehen wir hier von verhältnismäßig niedrigen Anteilen von Gebäuden mit Nachtabenkung aus.
- **Vorlauftemperatur des Heizkreises** (Einschätzung zum Stand der Technik aus Energieberater-Erfahrung): Hier wird je nach Baualtersklasse eine unterschiedliche Ausstattung unterstellt: Für Gebäude bis Baujahr 2001 werden zu 80 % herkömmliche Radiatoren mit einer Vorlauftemperatur von 55 °C angenommen und 20 % großflächigere Radiatoren mit einer Vorlauftemperatur von 45 °C, während bei neueren Gebäuden eine etwa hälftige Aufteilung auf großflächige Radiatoren und Fußbodenheizung mit 40 °C Vorlauftemperatur erfolgt.

Die resultierenden Zusammensetzungen sind in den folgenden Tabellen (Tabelle 5, Tabelle 6, Tabelle 7 und Tabelle 8) zusammengefasst. Es handelt sich bei den konkreten Zahlen wie oben erläutert um begründete Experteneinschätzungen; eine empirische Datengrundlage liegt jedoch nicht vor.

Tabelle 5: Verteilung der Bivalenzpunkte bei der Zusammensetzung der Simulationspools, differenziert nach Standort und Wohn- und Nichtwohngebäude.

	Hamburg		Kassel		München	
Bivalenzpunkt	WG	NWG	WG	NWG	WG	NWG
-2 °C	15 %	0 %	15 %	0 %	10 %	0 %
-7 °C	25 %	60 %	20 %	50 %	15 %	25 %
-9 °C	40 %	30 %	35 %	35 %	35 %	40 %
-12 °C	20 %	10 %	30 %	15 %	40 %	35 %

Tabelle 6: Zusammensetzung der Ein- und Zweifamilienhäuser (EZFH) im Simulationspool. Für alle Standorte wurde die gleiche Zusammensetzung angenommen.

Anteile	vor 1948	1949-1978	1979-2001	2002-2015	ab 2016
BAK (Baualtersklasse)	10 %	25 %	30 %	25 %	10 %
mit Nachtabenkung	50 %	50 %	65 %	60 %	60 %

¹ <https://www.waermepumpe.de/werkzeuge/klimakarte/>

teilsaniert	80 %	80 %	80 %	0 %	0 %
vollsaniiert bzw. Neubau	20 %	20 %	20 %	55 %	55 %
Neubau m. Fußbodenheizung	0 %	0 %	0 %	45 %	45 %

Simulationsmodelle

Tabelle 7: Zusammensetzung der kleinen Mehrfamilienhäuser (KMFH, bis 12 Wohneinheiten) im Simulationspool. Für alle Standorte wurde die gleiche Zusammensetzung angenommen.

Anteile	vor 1948	1949- 1978	1979- 2001	2002- 2015	ab 2016
BAK (Baualtersklasse)	30 %	30 %	30 %	5 %	5 %
mit Nachtabsenkung	25 %	25 %	40 %	35 %	55 %
teilsaniert	80 %	80 %	85 %	0 %	0 %
vollsaniiert bzw. Neubau	20 %	20 %	15 %	35 %	50 %
Neubau m. Fußbodenheizung	0 %	0 %	0 %	65 %	50 %

Tabelle 8: Zusammensetzung der Nichtwohngebäude (NWG) im Simulationspool. Für alle Standorte wurde die gleiche Zusammensetzung angenommen.

	Anteil
mit Nachtabsenkung	50 %
teilsaniert	75 %
vollsaniiert bzw. Neubau	25 %
Neubau mit Fußbodenheizung	0 %

4.3.2 Zusätzliche Zeitreihen

Neben den Simulationsergebnissen mit microSCOPE, die bereits die wesentlichen Ergebnisse enthalten (Strombezugs- und Wärmebereitstellungszeitreihen für Heizstab und Wärmepumpe, getrennt nach RW und TWW), wird zusätzlich noch der Anteil des Heizstabs an der Wärmebereitstellung sowie der COP, getrennt nach RW und TWW berechnet. Auftretende Datenlücken in den COP-Zeitreihen (z.B. durch nicht vorhandene Wärmebereitstellung RW im Sommer) werden durch Interpolation geschlossen.

4.3.3 Träge Tagesmitteltemperatur

Um die sinnvolle Zerlegung der Jahreszeitreihen in temperaturabhängige Tagesprofile zu ermöglichen, ist es nicht ausreichend, die Temperatur nur über einen einzelnen Tag zu mitteln. Auskühlungs- und Aufwärmprozesse der Gebäude dauern typischerweise mehrere Tage. Daher wird zunächst eine träge, gemittelten Tagestemperatur berechnet gemäß

$$T_{inertial}(d) = \frac{8}{15} \left[\frac{1}{8} T(d-3) + \frac{1}{4} T(d-2) + \frac{1}{2} T(d-1) + T(d) \right]$$

wobei $T(d)$ die Tagesmitteltemperatur an Tag d bezeichnet. Nach dieser gemittelten und gerundeten Tages-Außentemperatur werden die (aggregierten) Jahresprofile gruppiert und über die Tage des Jahres mit derselben Temperatur gemittelt.

4.3.4 Wärmemenge in Abhängigkeit der Außentemperatur (SigLinDe)

Um die täglichen Anteile der Wärmebereitstellung Raumwärme in Abhängigkeit der Außentemperatur zu bestimmen, kommt die empirisch ermittelte SigLinDe-Funktion zum Einsatz, analog zum Vorgehen bei der Erstellung der Lastprofilen des Gasverbrauchs im Gebäudebereich¹. Diese Funktion gibt an, welcher Anteil der Raumwärme-Bereitstellung eines Jahres bei welcher Außentemperatur erforderlich ist. Um die entsprechenden Funktionen für die vorliegenden Simulationsdaten zu bestimmen, werden zunächst die Raumwärmeanteile für die verschiedenen Gebäudeklassen über das träge Mittel der Außentemperatur aufgetragen und verglichen. Dabei zeigt sich, dass sich manche Gebäudeklassen sehr ähnlich verhalten, sodass es sinnvoll erscheint, sie weiter zu aggregieren: Zum einen über die Standorte, zum anderen über nur drei statt fünf Baualtersklassen, wobei jeweils die beiden ältesten (bis Baujahr 1978) und die beiden neuesten (ab Baujahr 2002) zusammengefasst werden. Weiterhin bestehen bleibt die Trennung nach EZFH und KMFH sowie innerhalb der NWG die Trennung in Werktage und Wochenende. Aus den Simulationsdaten werden Mittelwerte je Tagesmitteltemperatur gebildet, um den Effekt einzelner Ausreißer zu dämpfen.

Insgesamt trifft die SigLinDe-Funktion den Verlauf der Wärmebereitstellung sehr gut, vgl. Abbildung 28. Die sichtbare Streuung ergibt sich vorwiegend aus dem Effekt der solaren Einstrahlung, d. h. dass die Sonneneinstrahlung das Gebäude je nach Bewölkung mehr oder weniger stark zusätzlich aufheizt.

Über die Baualtersklassen hinweg zeigt sich in der Tendenz eine sinkende Heizgrenztemperatur, d. h. eine Verschiebung des Kurvenanstiegs von höheren zu tieferen Temperaturen, vgl. Abbildung 28, wo der Effekt v.a. zwischen den beiden unteren Plots deutlich zu sehen ist. Im Neubau fällt der Anstieg hin zu weniger tiefen Temperaturen weniger deutlich aus.

¹ <https://www.ffe.de/veroeffentlichungen/weiterentwicklung-der-standardlastprofile-gas/>

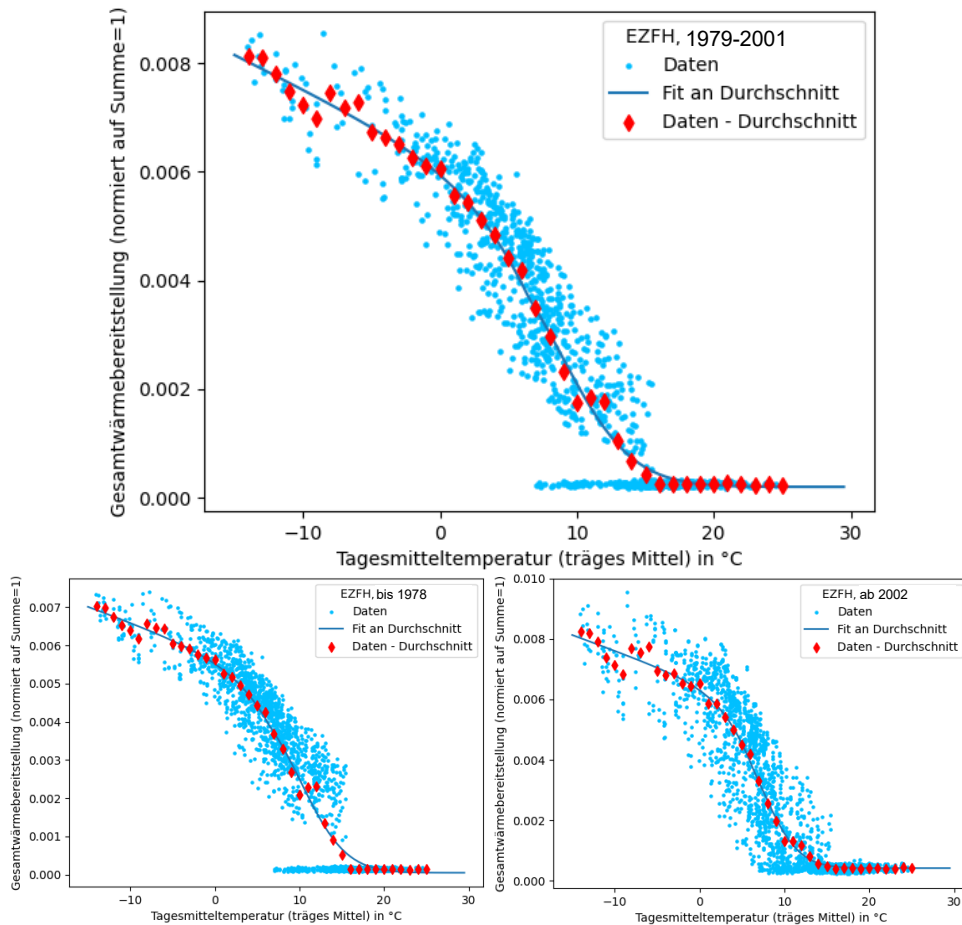


Abbildung 28: SigLinDe-Funktion (dunkelblau) und Simulationsdaten (hellblau), beispielhaft für EZFH mit Baualtersklasse 1979-2001 (großer Plot, oben) sowie für ältere Gebäude (bis 1978, unten links) und Neubau (ab 2002, unten rechts).

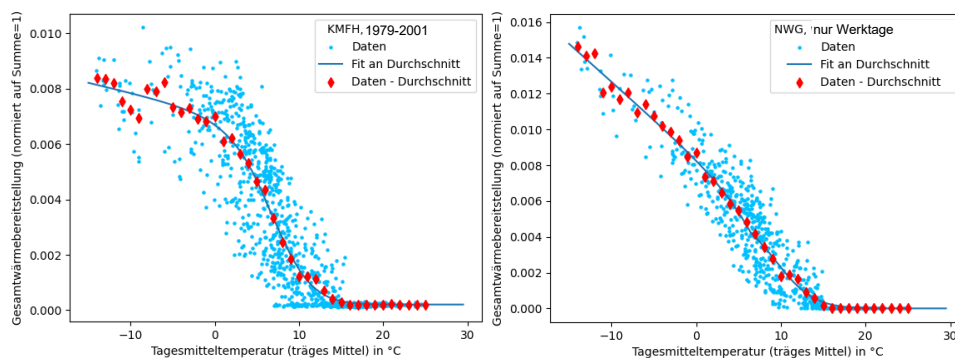


Abbildung 29: SigLinDe-Funktionen für Bürogebäude an Werktagen (links) sowie für MFH der mittleren Baualtersklasse.

4.3.5 Effektiver COP

Der effektive COP der Wärmepumpen – berechnet aus der Wärmebereitstellung der Wärmepumpen ohne Heizstabanteil und des Wärmepumpen-Stromverbrauchs – ist in Abbildung 30 dargestellt. Für alle Wohngebäude, also EZFH und KMFH, fällt er sehr ähnlich aus, daher ist nur eine EZFH-Kurve gezeigt. Bedingt durch die unterschiedlich angenommenen Vorlauftemperaturen fallen die Raumwärme-COPs für Bestandsgebäude (vor 2002 errichtet) und Neubau (ab 2002 errichtet) deutlich unterschiedlich aus. Durch den

hohen Anteil an Bestandsgebäuden im Gebäudepool liegt die COP-Kurve für die Raumwärmeerzeugung des gesamten Pools sehr nah an der Bestandsgebäude-Kurve. Der Trinkwarmwasser-COP fällt über alle Gebäude deutlich niedriger aus, was an der höheren zu erzeugenden Temperatur von i. d. R. 60 °C liegt.

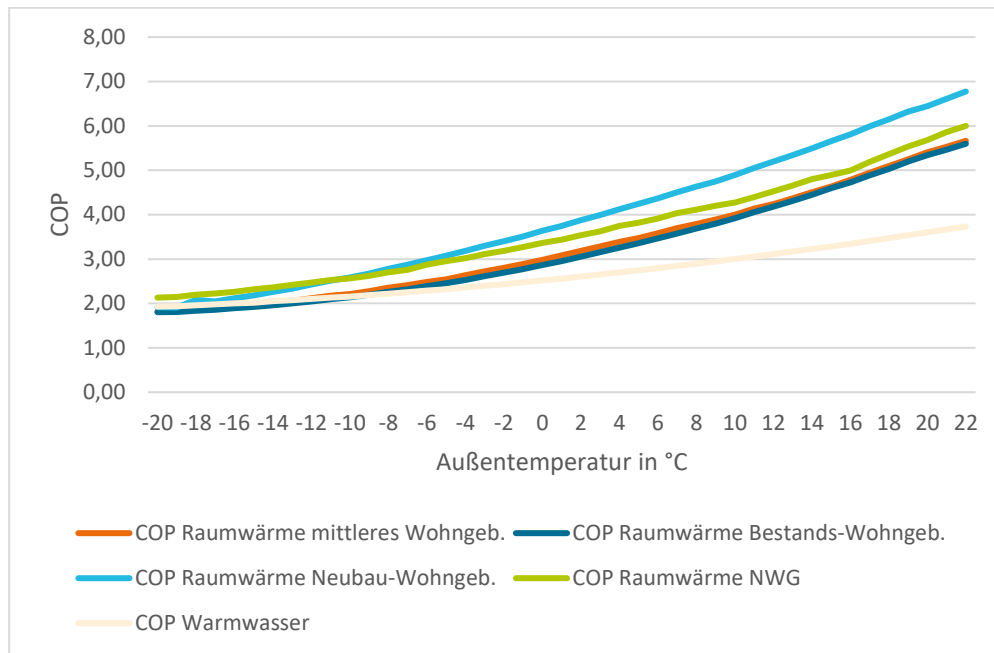


Abbildung 30: Effektiver COP der unterschiedlichen Wärmepumpen, getrennt nach Raumwärme und Wasser-Erwärmung

4.3.6 Simulationsbasierte Tagesprofile

4.3.6.1 Raumwärme-Bereitstellung

Die Zusammensetzung der Gebäude-Pools wurde so gewählt, dass die Tages-Wärmebereitstellungsprofile (vgl. Abbildung 15) für EZFH möglichst gut reproduziert werden. Für KMFH wurde diese Verteilung direkt übertragen, für Bürogebäude nur insofern übernommen, als dass die entsprechenden mittleren Bivalenzpunkte angesetzt wurden.

Beispielhafte Profile, für die weitere Verwendung auf eine Tagessumme von 1 normiert, sind in Abbildung 31, Abbildung 32 und Abbildung 33 beispielhaft für Kassel dargestellt. Insgesamt lässt sich feststellen, dass die Profile für höhere Temperaturen und damit abnehmende bereitgestellte Raumwärme etwas mehr statistisches Rauschen aufweisen. Der Effekt zeigt sich auch bei Bürogebäuden an Wochenend-Tagen, wo eine Temperaturabsenkung angenommen ist. Durch die geringe Tages-Energiemenge an diesen Tagen gehen solche Schwankungen nur mit deutlich niedrigerer Gewichtung in die Jahreslastgänge ein.

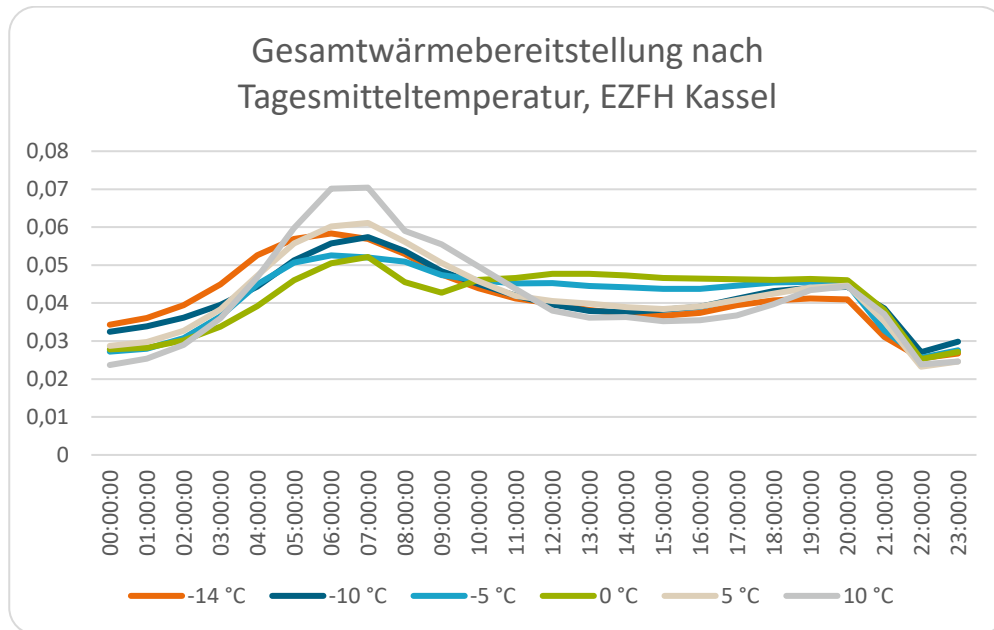


Abbildung 31: Tageslastprofile nach der Außentemperatur für EZFH am Standort Kassel, Mix über alle Baualtersklassen Gebäudemix), normiert auf Tagessumme = 1.

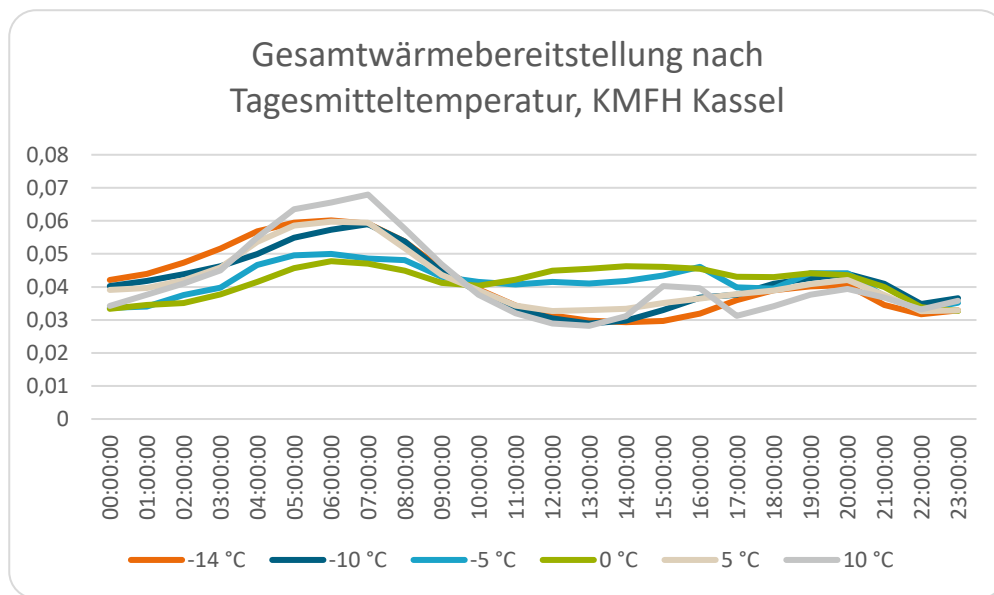


Abbildung 32: Tageslastprofile nach der Außentemperatur für KMFH am Standort Kassel, Mix über alle Baualtersklassen, normiert auf Tagessumme = 1.

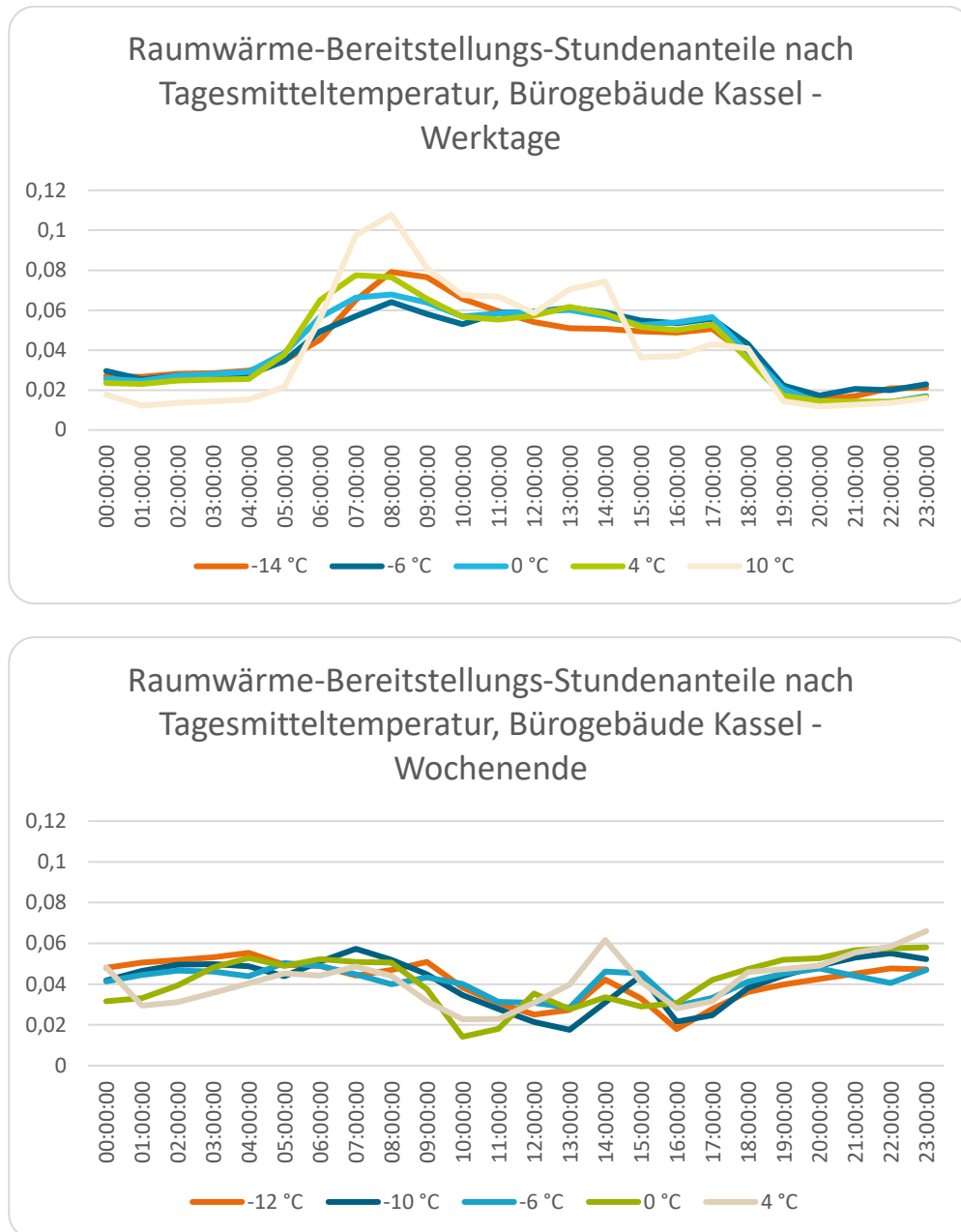


Abbildung 33: Tageslastprofile nach der Außentemperatur für Bürogebäude am Standort Kassel, separat nach Werktagen (oben) und Wochenend-Tagen (unten), jeweils normiert auf Tagessumme = 1.

4.3.6.2 Heizstabanteile

Die Heizstabanteile nach träger Tagesmitteltemperatur sind exemplarisch für Kassel in Abbildung 34, Abbildung 35 und Abbildung 36 dargestellt. Im Gegensatz zur Wärmebereitstellung sind diese Zeitreihen nicht auf eine Tagessumme von 1 normiert, damit sich der Heizstabeinsatz direkt aus der Wärmebereitstellung ableiten lässt, wenn sie einmal berechnet ist. Man erkennt, dass der Heizstabeinsatz in Wohngebäuden mit moderaten Anteilen bis zu knapp 14 % im Morgenpeak bei sehr tiefen Temperaturen von -14 °C beginnt, mit steigenden Temperaturen aber schnell abnimmt und rasch unter 10 % fällt. Das spiegelt die große Dimensionierung der Wärmepumpen wider, von denen ein großer Teil fast komplett monovalent betrieben werden kann.

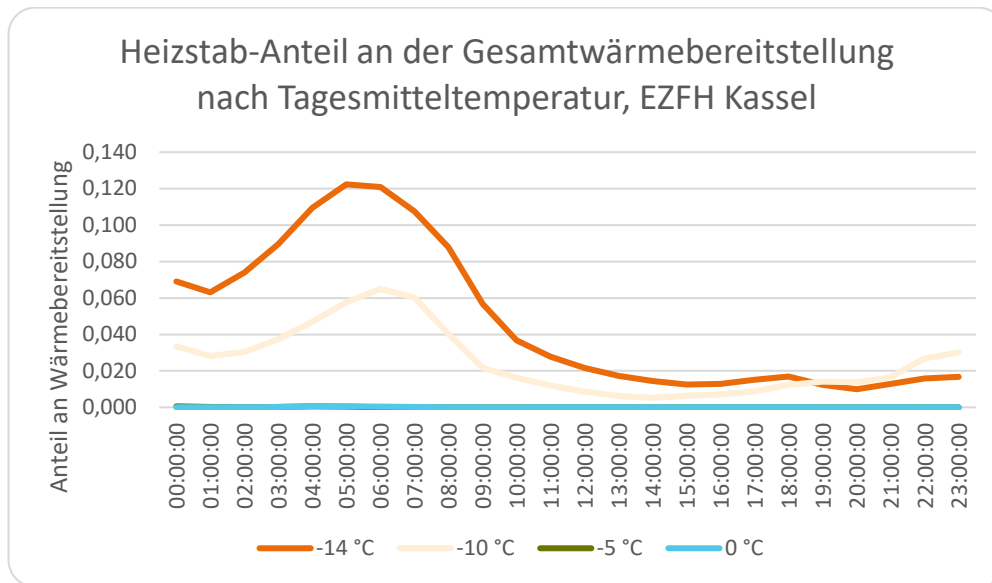


Abbildung 34: Heizstabanteil an der Gesamtwärmebereitstellung, EZFH in Kassel

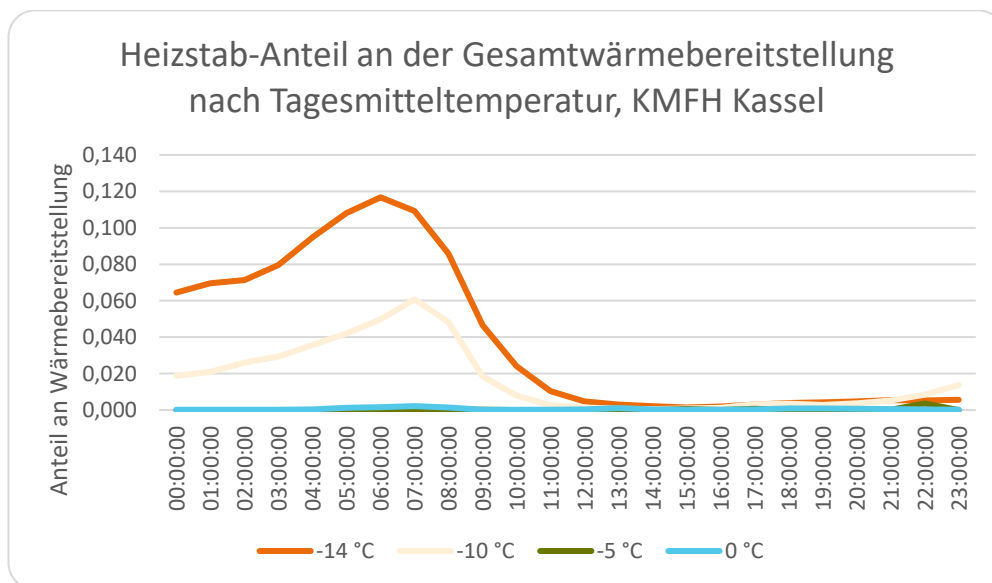


Abbildung 35: Heizstabanteil an der Gesamtwärmebereitstellung, KMFH in Kassel

Für die Bürogebäude, für die eine besser an die tatsächlichen Umgebungsbedingungen angepasste Dimensionierung angenommen wurde, ist der Heizstabeinsatz dagegen auch bei leichtem Frost mit bis zu 20 % deutlich höher, bei sehr kalten Temperaturen reicht er während der Aufheizphase in den Morgenstunden bis zu knapp 40 %.

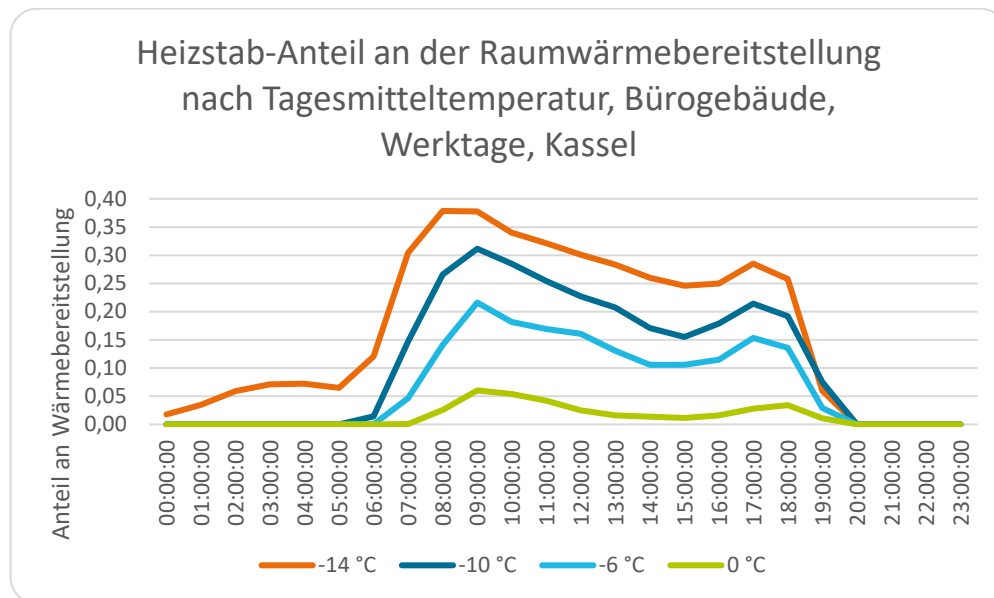


Abbildung 36: Heizstabanteil an der Gesamtwärmebereitstellung, Bürogebäude in Kassel.

4.3.7 Hinweise zur Nutzung/Zuordnung der GHD-Profile

Wie unter Abschnitt 4.2.1 erläutert war es im Rahmen dieser Kurzstudie nicht möglich, allgemein übertragbare GHD-Profile für alle Nichtwohngebäude zu erstellen, da deren Heterogenität sehr hoch ist. Trotzdem einige generelle Hinweise:

- Im Allgemeinen hängt der Einsatz der Profile stark von der **Datengrundlage** ab, zu der sie zugeordnet werden können. Gerade im NWG-Bereich sind räumlich aufgelöste Daten z.B. der Vermessungsämter stark mit Unsicherheiten behaftet und weisen hohe regionale Unterschiede in der Qualität auf, da sie dezentral erhoben werden. Wo der Typ eines Nichtwohngebäudes nicht näher bekannt ist, halten wir eine Modellierung als Bürogebäude für eine legitime grobe Abschätzung.
- Für die simulierten und ausgewerteten Bürogebäude ist jeweils eine **Nutzungszeit** Montag bis Freitag unterstellt. Für Gebäude mit zusätzlicher Nutzung am Samstag oder Sonntag scheint es plausibel, ein Werktags-Profil auch für den Samstag oder Sonntag einzusetzen. Das betrifft insbesondere samstags geöffnete Handels- und Verkaufsgebäude.
- Alle Bürogebäude sind mit **Wochenend-Absenkung** simuliert. Für Profile ohne Wochenend-Absenkung können Werktags-Profile auch für die Wochenend-Tage genutzt werden.
- Die Bürogebäude sind teils mit, teils ohne **Nachtabenkung** simuliert. Sie werden sowohl separat als auch in Kombination ausgewertet übergeben, um eine flexible Nutzung durch die ÜNB zu ermöglichen.
- Für **Hotels oder Gesundheitsgebäude** mit Unterbringung von Patienten kann erwogen werden, diese Gebäude wie Wohngebäude zu behandeln, da die Nutzung – zumindest im zeitlichen Profil – einer Wohnnutzung in etwa entspricht.
- Bei **Produktions- und Werksgebäuden** gehen wir davon aus, dass deren elektrische Hauptlasten im Prozessbereich (Verarbeitung/Produktion) und nicht für Wärmeerzeugung anfallen. Diese führen weiterhin zu einer schwer abschätzbaren Erwärmung der Gebäude durch die Abwärme der Prozesse. Produktions- und Werksgebäude sind daher nicht Gegenstand der Modellierung in dieser Kurzstudie, d. h. für diese Gebäude sollten die erarbeiteten Profile nicht verwendet werden. In der Regel wird es sich bei diesen Gebäuden ohnehin um RLM-Anschlüsse handeln.

5.1

Stand der Technik und technische Mindestausstattung zur Flexibilisierung

Wärmepumpen sind ein zentrales Element der Wärmewende und gewinnen durch ihre Stromnutzung und die Möglichkeit der Integration ins Smart Grid zunehmend an Bedeutung für das Energiesystem. Ihr flexibler Betrieb eröffnet die Möglichkeit, Lastverschiebungen zu realisieren und so sowohl das Stromnetz zu entlasten als auch auf Börsenstrompreise zu reagieren und den Eigenverbrauch von erneuerbarem Strom zu steigern. Im Folgenden werden der aktuelle Stand der Technik, bestehende Flexibilitätsoptionen und die dafür notwendige Mindestausstattung dargestellt.

5.1.1 Potenzial und Betrieb

Saisonalität

Das Potenzial für die Flexibilisierung, d. h. das Lastverschiebepotenzial einer Wärmepumpe und eines Pools an Wärmepumpen lässt sich vereinfacht in drei von der Außentemperatur abhängige Cluster einteilen:

- Kalte Tage: hier besteht eine große verschiebbare Energiemenge, aber geringerer Spielraum
- Warme Tage: hier stehen nur geringe Energiemengen zur Verschiebung bereit, dafür besteht aber eine hohe Flexibilität
- In der Übergangszeit ist beides gegeben, wenn auch nur in moderatem Umfang.

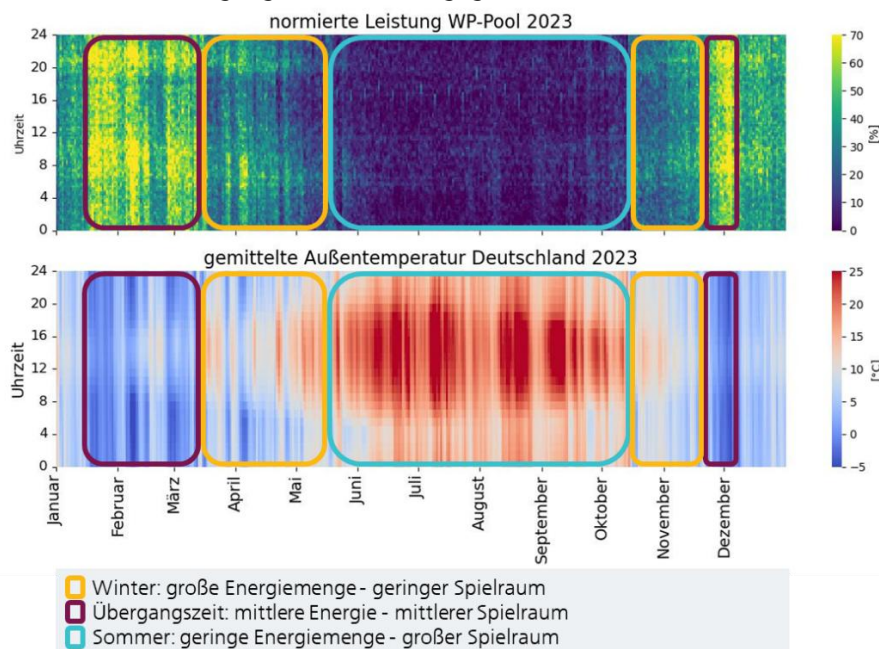


Abbildung 37: Jahreszeitliche Verteilung der Leistung des Wärmepumpenpools Fraunhofer ISE (286 Anlagen) und der Außentemperatur.

Abbildung 37 zeigt für Deutschland im Jahr 2023 den jahreszeitlichen Zusammenhang zwischen normierter Wärmepumpenleistung und Außentemperatur anhand von 286 Wärmepumpenanlagen.

Im heutigen Standardbetrieb laufen viele Wärmepumpen nahezu synchron, insbesondere morgens, abends und bei Kälteeinbrüchen. Dies führt zu hohen Gleichzeitigkeitsfaktoren und entsprechend hohen Lastspitzen im Stromnetz. Durch die gezielte Erschließung von Flexibilität – etwa mittels externer Steuerung oder eines Energiemanagementsystems – können die Betriebszeiten der Anlagen entkoppelt und auf geeignete Zeitfenster verteilt werden. So kann die Gleichzeitigkeit des WP-Betriebs deutlich reduziert werden, was zu einer Entlastung des Netzes und einer besseren Integration erneuerbarer Energien führt. Erste Untersuchungen mittels einer Simulationsstudie zeigten schon vor Jahren, dass sich die Gleichzeitigkeit durch Flexibilitätsererschließung um bis zu 70 % senken lässt, was sowohl die Netzbelastung als auch die Stromkosten für Nutzer reduziert [Fischer 2017]. Signifikante Effekte von flexiblem Betrieb auf die Gleichzeitigkeit von Wärmepumpen (als indirektes Maß der Netzbelastung) wurden ebenfalls in [IEE&ISE 2025] beobachtet.

Neben einer isolierten Betrachtung von Wärmepumpen für das Stromnetz kommen zunehmend auch komplexere Rückwirkungen in Eigenstromsystemen in den Fokus z.B. in selbstgenutzten Einfamilienhäusern. Am Beispiel einer einzelnen Anlage mit einer typischen Dimensionierung – $\sim 4 \text{ kW}_{\text{el}}$, 11,7 kWh Batterie und 12,4 kWp PV wird im Folgenden gezeigt, das bis auf etwa 20 Tage mit dem höchsten WP-Stromverbrauch und sehr geringen solaren Beiträgen – die Wärmepumpe nahezu durchgehend mit hohen solaren Anteilen versorgt werden kann. Es zeigt auch, dass die höchsten Verschiebepotenziale in der Übergangszeit liegen (Quelle: WPQS 2025)

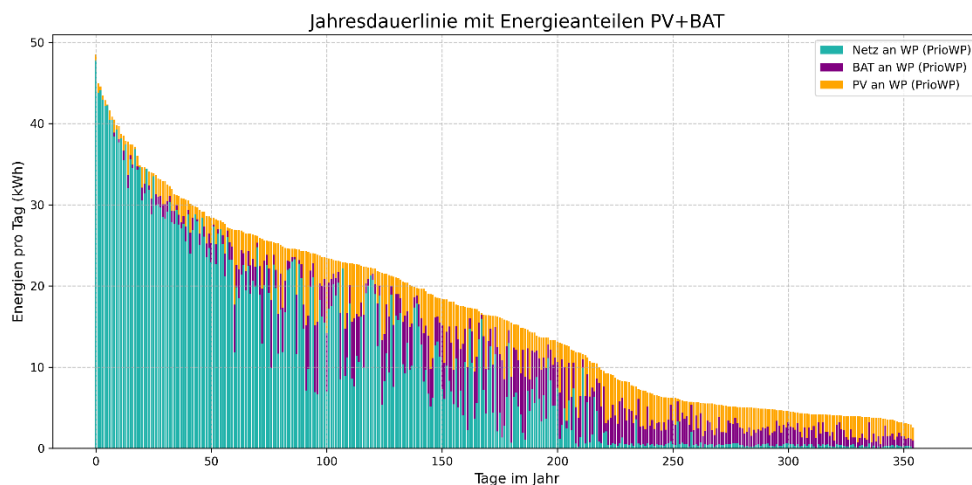


Abbildung 38: Jahresdauerlinie aufgeteilt nach Netz, Batteriespeicher und PV-Anteil. Durch Temperaturerhöhung im Warmwasserspeicher wird die Flexibilität erhöht. Die Optimierung des Eigenstromverbrauches ist Hauptziel der Optimierung.

Betriebsweise der Wärmepumpe

Der Betrieb von Wärmepumpen erfolgt in der Regel wärmegeführt, d. h., die Anlage arbeitet nach einer Solltemperaturregelung. Die Solltemperatur für die Raumheizung wird dabei meist durch eine Heizkurve auf Basis der Außentemperatur bestimmt, teilweise aber auch durch eine direkte Raumtemperaturmessung. Die Temperatur kann sowohl im Vorlauf, im Rücklauf oder im Speicher gemessen werden. Die Wärmepumpe schaltet sich ein, sobald die gemessene Temperatur unter die Solltemperatur abzüglich einer festgelegten Hysterese fällt. Sie schaltet aus, wenn die Solltemperatur zuzüglich der Hysterese erreicht wird. Falls die Wärmepumpe die erforderliche Solltemperatur nicht

alleine erreichen kann oder die Außentemperatur unterhalb der sogenannten Bivalenztemperatur liegt, wird ein elektrischer Heizstab als Zusatzheizung aktiviert. Inverter-geregelte Wärmepumpen sind besonders gut in der Lage, die Solltemperatur exakt nachzufahren. Die für die Heizung erforderlichen Temperaturen liegen typischerweise im Bereich von etwa 30 bis 70 °C, je nach Übergabesystem und Auslegung der Leistung des Übergabesystems im Vergleich zur Heizlast des Gebäudes. Der Spielraum für eine Temperaturerhöhung mit der Wärmepumpe ist bei Neubauten mit Fußbodenheizung in der Regel größer, während er bei Altbauten mit klassischen Heizkörpern eher eingeschränkt ist. Je näher die Außentemperatur an die Normauslegungstemperatur heranrückt, desto geringer wird der Spielraum.

Flexibler Betrieb von
Wärmepumpen

5.1.2 Technische Flexibilitätsoptionen

Das Flexibilitätspotenzial von Wärmepumpen ergibt sich vor allem aus der Möglichkeit, Wärme vorzuproduzieren und zu speichern, um den Stromverbrauch zeitlich zu verschieben. Hierbei spielen elektrische und thermische Speicher eine zentrale Rolle: Ein ausreichend dimensionierter Heiz- oder Warmwasserspeicher erlaubt es, die Wärmepumpe gezielt früher oder später zu betreiben. Je größer der Speicher, desto mehr Flexibilität steht zur Verfügung. Auch die Gebäudemasse selbst kann – insbesondere bei gut gedämmten Neubauten mit Fußbodenheizung – als Wärmespeicher genutzt werden.

Batterie als zusätzliche Flexibilität in WP-Systemen

Batterien weisen im Vergleich zu WP keine saisonalen Restriktionen auf und können unmittelbar zum Lastmanagement genutzt werden. Sie können sowohl den Eigenstromanteil von Wärmepumpen erhöhen als auch Fremdstrombezugskosten bei dynamischen Stromtarifen und Netzentgelten reduzieren. Ende 2023 waren 40 % der Aufdach-PV-Anlagen mit Batterien versehen, bei den Neuinstallationen waren es 2023 fast 80 % [Philipps, 2025]. Die Größe dieser Systeme variiert in der Regel zwischen 5 kWh und 15 kWh. Bezogen auf eine elektrische Leistung einer Wärmepumpe von 3 kW entspricht das bei einem Speicher von 10 kWh einer maximalen Verschiebung unter Volllast von 3h und 20 Min.

Thermische Speicher

Thermische Speicher bieten das größte Potenzial zur Flexibilisierung des Wärmepumpenbetriebs. Pufferspeicher sind vor allem während der Heizperiode von Bedeutung. Wird die Größe und Temperatur des Speichers erhöht, steigt die Flexibilität, allerdings gehen damit auch höhere Speicherverluste und eine geringere Effizienz einher.

Abbildung 39 zeigt links den nutzbaren Energieinhalt in Abhängigkeit von Speichergröße und Temperaturanhebung sowie rechts die Entladedauer bei unterschiedlichen Be- und Entladeleistungen.

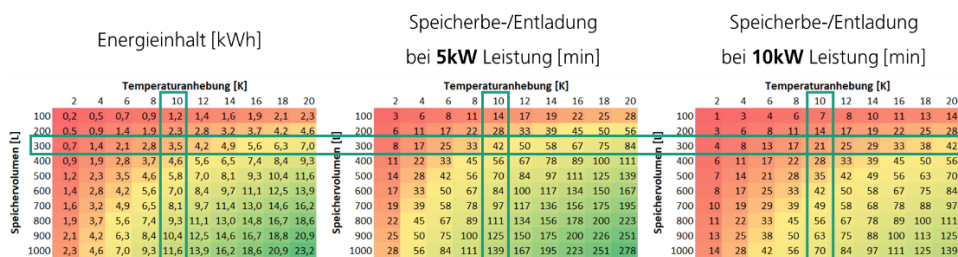


Abbildung 39: Zusammenhang zwischen Speichergröße, Temperaturanhebung und Energieinhalt (links) sowie der Dauer der Entladung bei unterschiedlicher Be- und Entladeleistung. Beispiel: Bei einem 300 l Speicher und einer Temperaturanhebung von 10 K entspricht das einem Energieinhalt von 3,5 kWh, bei einer thermischen Leistung von 5 kW_{th} dauert die Be- und Entladung 42 Minuten, bei 10 kW_{th} 21 Minuten

Leistungsregelung und Dimensionierung

Flexibler Betrieb von
Wärmepumpen

Neben der Speichertechnik gibt es weitere technische Möglichkeiten zur Flexibilisierung. Modulierende, also leistungsgeregelte Wärmepumpen ermöglichen eine feinere Steuerung und bessere Anpassung der Leistung an den tatsächlichen Bedarf. Durch eine größere Dimensionierung der Anlage lässt sich der Bivalenzpunkt einer Anlage hin zu kälteren Temperaturen verschieben bzw. auf einen monovalenten Betrieb wechseln.

Die Auslegung der WP-Leistung im Verhältnis zur maximalen Heizlast und zur Speichergröße ist für das Flexibilitätspotenzial entscheidend: Eine bewusste Überdimensionierung der Wärmepumpe erhöht die Fähigkeit, in kurzen Zeitfenstern mehr Wärme zu erzeugen; jedoch steigen dadurch die Investitions- und Betriebskosten, während die Effizienz durch häufiges Takten im Teillastbetrieb sinkt. Elektrische Heizstäbe können für eine schnelle Laststeigerung genutzt werden, sind allerdings im Betrieb ineffizient und verursachen hohe Stromkosten. Ein wirksamer Hebel zur Reduktion der Gleichzeitigkeit des Strombezugs ist die zeitabhängige Begrenzung des Einsatzes der Heizstabstufen. Dadurch werden Teillasten in Zeiten geringerer Netzlast verlagert.

Regelung und Steuerung

Technische Voraussetzung für die Erschließung von Flexibilität ist, dass die Wärmepumpe mit einer Kommunikationsschnittstelle ausgestattet ist. In Bezug auf die Funktionalität der Kommunikationsschnittstellen gibt es große Unterschiede – vom einem einfachen AN/AUS- Signal bis hin zur Erfassung von Betriebszuständen der Wärmepumpe und Vorgabe einer bestimmten Leistung bzw. Drehzahl bei durch Inverter geregelten Verdichtern. Bereits mit einer SG-Ready-Wärmepumpe, einem geeigneten Speicher und einem simplen Steuerrelais kann Flexibilität erschlossen werden. Ein vollwertiges Energiemanagementsystem erweitert die Möglichkeiten, ist aber keine zwingende Voraussetzung für die Basiserschließung von Flexibilität. Für die Umsetzung externer Steuersignale ist ein Steuergerät oder ein einfaches Energiemanagementsystem (EMS) erforderlich, dass die Signale empfängt und an die WP weitergibt. Ein EMS kann zudem weitere flexible Verbraucher im Haus einbinden.

Für variable Signale oder prozentuale Leistungsanforderungen benötigt man digitale, busbasierte und meist bidirektionale Schnittstellen wie z.B. Modbus, EEBus, SML (Smart Meter Language) und Herstellerspezifische APIs. Mit diesen Schnittstellen kann ein Energiemanagementsystem oder ein externer Akteur der Wärmepumpe exakt vorgeben, mit welcher Leistung sie arbeiten soll. Aktuell werden „Home Energy Management Systems (HEMS)“ insbesondere zur Abstimmung von Eigenstromerzeugung durch PV, Batteriespeicherung, Ladung Elektrofahrzeuge und Wärmepumpen genutzt. Dabei arbeiten die meisten HEMS mit dem Ziel einer wirtschaftlichen Optimierung.

5.2

Preismechanismen zur Erschließung von Flexibilitäten von Wärmepumpen

Die zunehmende Sektorkopplung und der notwendige, schnelle Ausbau von dezentral einspeisenden, fluktuierenden Stromerzeugern führt zu einer höheren Beanspruchung der Verteilnetze und zu einer erheblichen Veränderung der Preise an den Strommarktbörsen. Um lokale Flexibilitätsoptionen besser nutzen zu können und den notwendigen Ausbau der Verteilnetze kostenoptimal gestalten zu können erfolgt eine regelmäßige Anpassung des Strommarktdesigns. Mit der Novelle des §14a EnWG zum 01.01.2024 wurden Veränderungen sowohl bei der Vergütung von eingespeistem PV-Strom als auch bei Strom zum Betrieb einer Wärmepumpe eingeführt. Dies bezieht sich auf Anlagen, die nach Inkrafttreten der Novelle installiert wurden. Die Novelle adressierte

unterschiedliche Komponenten des Strompreises: Den Arbeitspreis, Kosten für Zählerinfrastruktur und Netzentgelte.

Flexibler Betrieb von
Wärmepumpen

5.2.1 Dynamischer Strompreis mit Orientierung am Börsenstrompreis und dessen Dämpfung durch sonstige Stromkostenbestandteile

Bei den aktuellen Tarifmodellen mit dynamischem Tarif orientiert sich dieser an den sich stündlich ändernden Strompreisen auf der Basis von Day-Ahead Börsenpreisen (EPEX Spot Marktpreis). Hinzu kommt in der Regel ein fixer Sockelbetrag. Der dynamische Anteil beträgt rund ein Viertel der Stromkosten. Grundsätzlich kann die Mehrwertsteuer mit 19 % aber als eine Verstärkung des Preisspreads des Börsenpreises wirken. Die Höhe des Sockelbetrages aus Stromsteuer, Netzentgelte und sonstigen Stromkostenbestandteilen reduziert dagegen die Flexibilitätsanreize des Börsenpreises, weil mit der Flexibilität verbundenen Ineffizienzen (Speicherverluste, schlechterer COP und Heizstabeinsatz) überproportional mit Kosten belegt werden. Eine diskutierte Reduktion der Stromsteuer auf das europäische Minimum und eine Dynamisierung von Netzentgelten oder Wälzung für Leistung würde dagegen am Strommarkt flexibel eingesetzte Wärmepumpen begünstigen.

Alternativ können Aggregatoren auch Geschäftsmodelle mit direkter Steuerung entwickeln und neben dem Day-Ahead-Markt auch andere Teilmärkte wie Intraday oder Regelleistung, sowie eine Integration in einem marktbasierten Redispatch adressieren. In jedem Fall stellt aber der Day-Ahead-Preis die Referenz für Flexibilitätserlöspotenziale dar.

5.2.2 Netzentgelte

Schaltbare Verbraucher nach §14a EnWG

Die WP-Tarife werden aufgrund der Novelle des §14a EnWG zum 01.01.2024 unterschieden. Dieses Datum trennt die WP-Tarife alt und neu. Wärmepumpeninstallationen nach dem 01.01.2024 benötigen demnach ausschließlich den WP-Tarif neu. Der WP-Tarif neu geht damit einher, dass die Wärmepumpenleistung durch den Netzversorger vorübergehend auf 4,2 kW begrenzt werden kann (bis zu 2h pro Tag), um Netzüberlastungen vorzubeugen. Für den Nachteil der potenziellen Leistungsbegrenzung der Wärmepumpe gibt es einen gesetzlich vorgesehenen finanziellen Ausgleich. Dieser Ausgleich wird je nach Ausgestaltung als Modul 1, 2 oder 3 beschrieben.

Tabelle 9: „Module“ zur Reduktion der Netzentgelte bei schaltbaren Stromverbrauchern nach §14a EnWG

Modul 1 (Pauschal)	Modul 2 (Prozentual)	Modul 3 (Zeitvariabel)
Pauschale Reduzierung des Netzentgeltes - unabhängig von dem Verbrauch. Kein separater Zähler für das Gerät erforderlich	Senkung des Netzentgelts um 60 %. Das Netzentgelt ist Bestandteil des Strompreises. Die Höhe der Entlastung ist abhängig vom Verbrauch.	Ziel dieses Moduls ist die Reduzierung von Lastspitzen im Netz. Es sind Zeitfenster mit drei Netzentgelttarifen vorgesehen.

Netzentgeltreform zur besseren Vereinbarkeit von Markt und Netz

Im Zuge der Weiterentwicklung der Netzentgeltsystematik läuft aktuell ein Konsultationsprozess der Bundesnetzagentur, in dem verschiedene Optionen für die Einführung von Netzentgelten für sog. Prosumer im Hinblick auf Ihre Auswirkungen auf Flexibilitätsoptionen erörtert werden. Im Rahmen des „AgNes-Prozesses“ werden weitere Modelle für die Entwicklung der Netzentgeltsystematik diskutiert und erörtert hinsichtlich der

Zielgrößen „Anreiz des Zubaus Erneuerbarer Erzeugungsanlagen“, „sozialer Verträglichkeit“ und „Anreiz für einen netzdienlichen Betrieb und Einspeisung“ (QUELLE: AgNes Konsultation 5.12.). Untersucht werden die Optionen: Grundpreis, jahreszeitlich variabler Grundpreis, Kapazitätspreis und dynamische Netzentgelte. Aktuell bestehen hier noch Unsicherheiten in der konkreten Ausgestaltung. In der Tendenz ist aber zu erwarten, dass zukünftig je nach lokaler Last- und Erzeugungssituation und entsprechender Verteilnetzbelastungen zeitweise eine bessere Strommarktintegration oder eine Spitzenlastreduktion preislich angereizt wird.

Flexibler Betrieb von
Wärmepumpen

5.2.3 Eigenstromerzeugung und Flexibilität

Die Wirkung von Preismechanismen zur Erschließung von Flexibilitäten von Wärmepumpen hängt stark von der Möglichkeit eigen erzeugten Strom, in der Regel Photovoltaik, zu nutzen. Das Vergütungsmodell für Photovoltaik wird primär durch die Einspeisevergütung nach EEG geprägt. Da die erste große Welle der Installation in den Jahren 2010 – 2013 in den Jahren 2030-2033 aus der Förderung fällt, werden hier zusätzlich zu den neu errichteten Anlagen auch Altanlagen mit den dann geltenden Stromkosten/-vergütung, Umlagen und Netzentgelten betrieben werden. Aufgrund des aktuell großen Spreads zwischen Netzbezug und Eigenerzeugung von 15-20 ct/kWh ist die Eigenstromnutzung wesentlich attraktiver als der Bezug aus dem Netz, auch bei einem dynamischen Stromtarif. Reduziert wird dieser Effekt dann, wenn ein Modell mit erhöhten Grundpreisen eingeführt wird oder wenn sogar auf den Eigenverbrauch Netzentgelte zu zahlen wären.

Wendet man die unterschiedlichen, aktuell verfügbaren Tarifmodelle auf die gemessenen Verbräuche von 40 Wärmepumpenanlagen an, so lässt sich zum einen zeigen, dass die unterschiedlichen Betriebsweise der Anlagen und unterschiedlichen Verbräuche pro Zähler zu Differenzen in den Strompreisen von rd. 2 ct/kWh. führen. Mit steigendem Verbrauch sinkt der Strompreis aufgrund geringeren Anteils des Grundpreises und der Netzentgelte. (Abbildung 40, Quelle WP-QS 2025).

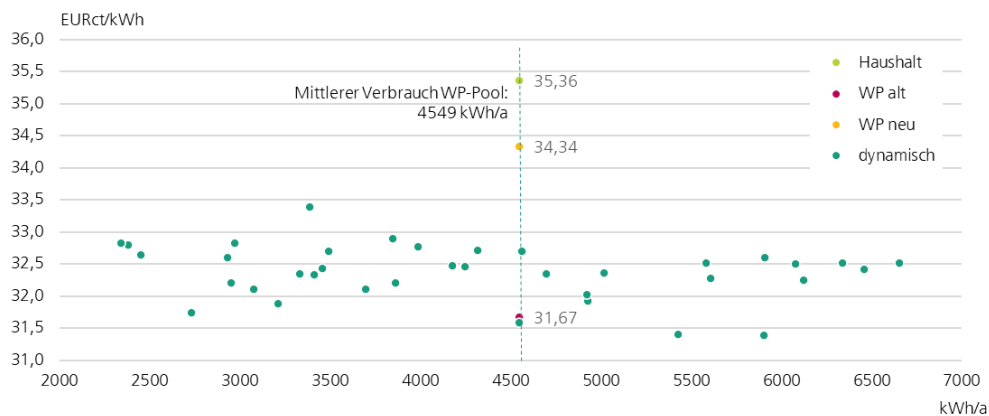


Abbildung 40: Stromkosten für 40 Wärmepumpensysteme für das Jahr 2024 für einen dynamischen Stromtarif, HH-Strom, einen Wärmepumpentarif nach §14a EnWG und einem Wärmepumpen Alt-Tarif ohne Netzeingriffsmöglichkeit in Abhängigkeit der jährlichen Stromverbrauchs der Anlage. Quelle: WP-QS

5.2.4 Qualitative Einordnung der Wirtschaftlichkeit der Flexibilisierung von Wärmepumpen

Die Flexibilität hat für die Reduktion der Netzbelastung eindeutige Vorteile, aber für die Vermarktung der Flexibilität am Strommarkt sind diese moderat. Dies gilt für einen zukünftigen Strommarkt mit hoher Durchdringung von anderen Flex-Optionen, welche Preisspreads teilweise kannibalisieren. Im heutigen Markt werden hohe Preisspreads von

hohen sonstigen Strompreisbestandteilen (in Verbindung mit den Effizienzeinbußen im flexiblen Betrieb) unterbunden.

Flexibler Betrieb von
Wärmepumpen

Erste Analysen zeigen, dass überdimensionierte WP mit etwas größeren Heizungspuffer-Speichern (Vermarktung durch Aggregatoren) noch keinen umfangreichen ökonomischen Mehrwert im Vergleich zu einem Gebäude-Mix des Wärmepumpenbestandes bieten [IEE&ISE 2025]. Batterien lassen sich wirkungsvoller/effektiver bei Strompreisunterschieden einsetzen, sind aber relativ zum Stromverbrauch von Wärmepumpen klein. Es ist damit zu rechnen, dass sich prädiktive Regelungen im Feld zur Steigerung der Effizienz durchsetzen, die etwa den typischen Verlauf von Temperatur und/oder Verbrauch über den Tag hinweg berücksichtigen können. Dies kann einerseits die Effizienz von unflexiblen Wärmepumpen steigern, als auch die Schwelle zur flexiblen Einbindung reduzieren.

In der aktuellen Regulierung sind Kostenreduktion durch Effizienzsteigerung prioritär gegenüber einer Flexibilisierung. Aber mit der Einführung von Home Energy Managementsystemen HEMS in Verbindung mit Kosten für Verteilnetze bzw. knappen Netzanschlüssen kann dies in Summe der Hebel für Strommarktflexibilität werden. Aus der Verbindung von Einsparungen bei Netzentgelten, Effizienzsteigerungen und Flexibilitätsvermarktung durch Aggregatoren am Strommarkt kann sich ein Geschäftsmodell für den flexiblen Wärmepumpeneinsatz ergeben.

5.3

Szenarien für den Hochlauf der Flexibilitätsoptionen

Für den Hochlauf der Flexibilitätsoptionen von Wärmepumpen sind folgende Einflussfaktoren maßgeblich:

- **Nutzung / Art des Gebäudes:** Ein-/ Zweifamilienhäuser haben eine relativ große Dachfläche im Vergleich zur Wohnfläche und haben aufgrund dessen einen höheren Potenzial zur lokalen Erzeugung von Strom durch Photovoltaik. In Mehrfamilienhäusern ist diese aufgrund der Kubatur geringer. Nichtwohngebäude haben eine sehr unterschiedliche Struktur (Bürogebäude, Hallen), die unterschiedliche Flächenpotenziale für die Erzeugung von PV-Strom haben. In diesem Gebäudetyp ist das Lastprofil je nach Nutzung deutlich stärker von z.B. der Produktion dominiert als in Wohngebäuden, wo der Strom- und Leistungsbedarf eine Wärmepumpe einen signifikant hohen Anteil hat. Der Energie- und Leistungsbedarf der Gebäude – unterscheidet sich nach den Baualtersklassen. Bei älteren Gebäuden und höheren Verbräuchen ist die Leistung höher, die durch Flexibilitäten erschlossen werden kann, dafür die Dauer geringer bei gleicher Speicherdimensionierung.
- **Eigentümer und Betreibermodell:** Im Wesentlichen ist die Frage, ob eine Immobilie selbst genutzt wird oder ob es sich um ein Gebäude in Vermietung handelt. Bei eigengenutzten Gebäuden sind zum einen die Handlungsmöglichkeiten höher, da betriebliche Eingriffe nicht gegenüber Mietern zu rechtfertigen sind. Zum anderen spielt die Ausgestaltung von Mieterstrommodellen eine wichtige Rolle für den Umfang der lokalen Stromerzeugung, ob ein flexibler Betrieb wirtschaftlich vorteilhaft ist. Die Marktentwicklung ist hier unsicher und wird daher konservativ abgeschätzt.
- **Technische Ausstattung:** Eine wesentliche Voraussetzung für die Erschließung der Flexibilitätsoptionen sind elektrische und thermische Speicher. Thermische Speicher haben einen etwas höheren Speicherverlust als Batteriespeicher, aber in der Regel auch einen größeren Speichergehalt. Aktuell ist ein sehr starkes Wachstum von Home-Speichern in Verbindung mit der Installation von PV-

Anlagen zu beobachten. Mit der Option bidirektionalen Ladens von elektrischen Fahrzeugen (Vehicle-to-Grid, V2G) steigt der zur Verfügung stehende elektrische Speicher erheblich.

Flexibler Betrieb von
Wärmepumpen

- Regulatorische und marktliche Randbedingungen: Die im vorigen Abschnitt beschriebenen wirtschaftlichen Anreizmechanismen werden vor allem durch die regulatorischen Randbedingungen geprägt, die noch in der Ausgestaltung sind. Dabei wird hier die Prämisse gesetzt, dass diese im Laufe der Jahre so ausgestaltet werden, dass ein ausreichender Anreiz für netzdienliches Verhalten geschaffen wird. Aus Kundensicht stellt sich eine Unterscheidung zwischen dynamischen Netzentgelten und variablen Stromtarifen auf Basis des Börsenstrompreises nicht dar, relevant sind die fixen und die dynamischen Anteile.

Auf Basis dieser qualitativen Beschreibung der unterschiedlichen Einflussfaktoren wird im Folgenden ein Szenario für den Hochlauf der Flexibilitätspotenziale dargestellt. Dabei werden folgende Grundlagen und Annahmen verwendet:

- Für den Anteil der Wärmepumpen in den Stützjahren wird auf das Ariadne-Szenario „Technologiemix“ zurückgegriffen (Ariadne 2025, Abb. 4.2). Dabei steigt der Anteil der Wärmepumpen an den Wärmeversorgungssystemen von 5 % im Jahr 2025 auf 18 % in 2030, 35 % in 2035, 50 % in 2040 und 65 % in 2045. Im Vergleich zum Netzentwicklungsplan entspricht dies dem Szenario B (NEP 2025). Dabei ist zu beachten, dass diese Szenarien vor der Verschiebung der Implementierung des ETS II für den Gebäudebereich parametrisiert wurden und auch Verzögerungen bei der nationalen Umsetzung der EPBD im Gebäudeenergiegesetz nicht antizipiert sind. Es ist daher mit einer Verzögerung im Hochlauf zu rechnen, nicht aber im Ziel.
- Entwicklung der technischen Ausstattung: Statistisch wird die Ausstattung der Merkmale Gebäude mit Wärmepumpe, Wärmepumpe und Photovoltaikanlage und Wärmepumpe, Photovoltaikanlage und Batteriespeicher nicht erhoben. Einen Hinweis auf die Zusammensetzung gibt die erste Welle der Befragung des Wärme- und Wohnen-Panels des RWI aus dem Jahre 2021 (WuW 2023). Aufgrund des sehr schnellen Wachstums insbesondere der Batteriespeicher ist die Extrapolation mit Unsicherheiten belastet. Für eine Szenarienentwicklung wird davon ausgegangen, dass in Mehrfamiliengebäuden die Wärmepumpensysteme in geringerem Umfang mit PV-Anlagen bzw. PV-Anlagen und Batterie kombiniert werden, da die Hemmnisse für Mieterstrommodelle höher sind und der im Vergleich zur beheizenden Wohnfläche zur Verfügung stehenden Dachfläche geringer ist. Für den Sektor der Nichtwohngebäude wird die Entwicklung stärker von der Investitionsfähigkeit der Unternehmen geprägt sein.

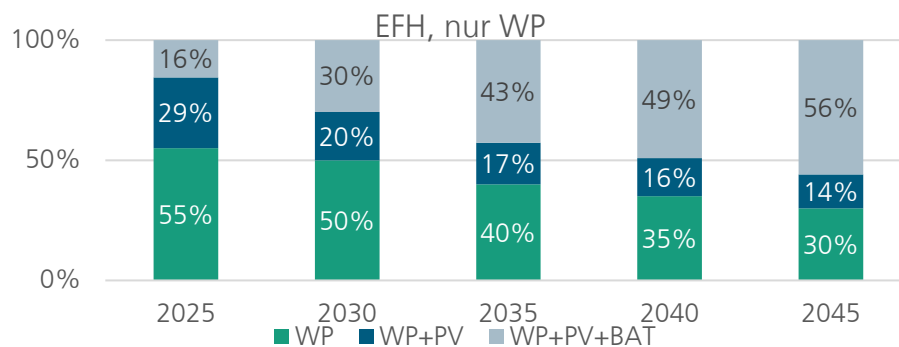


Abbildung 41: Szenario Anteil der Technischen Ausstattung in Einfamilienhäusern mit Wärmepumpen in Deutschland

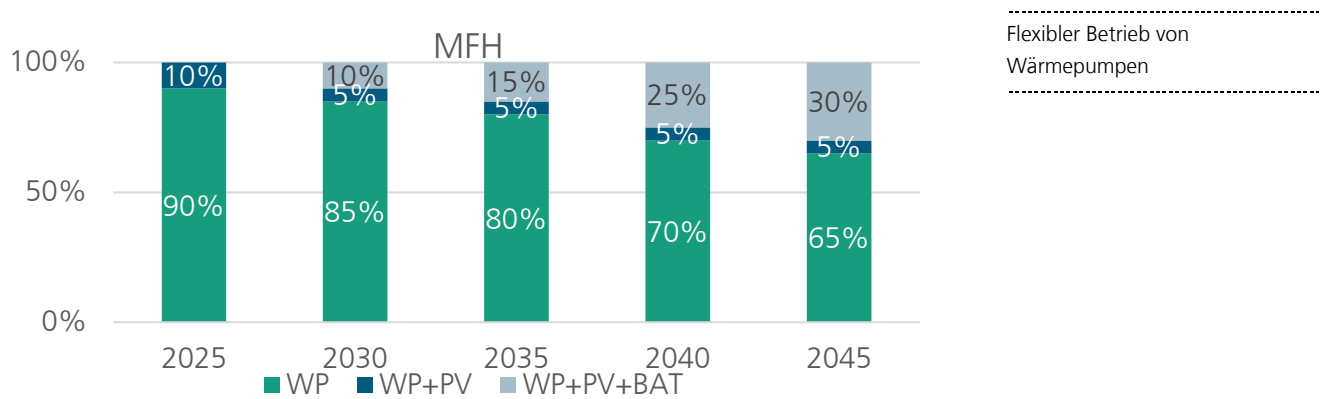


Abbildung 42: Szenario Anteil der Technischen Ausstattung in Mehrfamilienhäusern mit Wärmepumpen in Deutschland

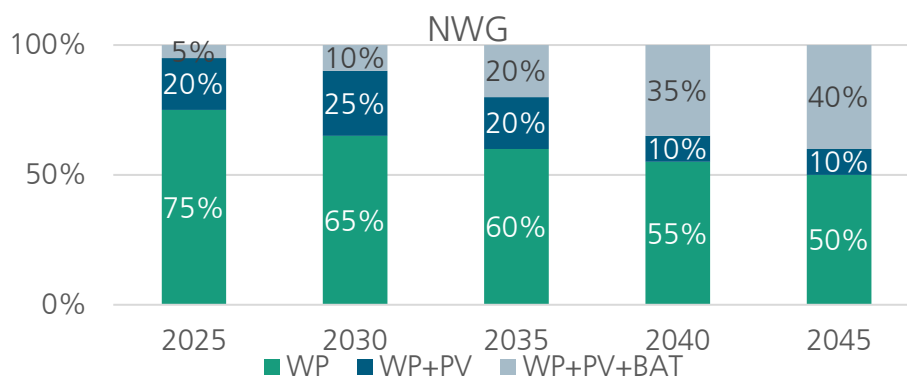


Abbildung 43: Szenario Anteil der Technischen Ausstattung in Nichtwohngebäuden mit Wärmepumpen in Deutschland

- Anteile Wärmepumpensystemen mit flexiblen Anreizsystemen. Unter flexiblen Anreizsystem werden sowohl die Drosselung nach §14a ENWG als auch dynamische Netzentgelte zusammengefasst. Aufgrund der noch offenen Diskussion, welches Netzentgeltmodell nach Abschluss des AgNes-Prozesses umgesetzt wird sind die Effekte deutlich unterschiedlich. Bei einem dynamischen Tarif ist das ökonomisch erschließbare Flexibilitätspotenzial höher. Bei allen Tarifmodellen ist davon auszugehen, dass die Ausgestaltung so erfolgt, dass mit Einführung eine hohe Durchdringung des Marktes erfolgen wird (Abbildung 44, Abbildung 45).
In der Darstellung sind WP+PV-Systeme, die noch nach der alten EEG-Systematik für PV-Anlagen tariflich behandelt werden und aufgrund der im Vergleich zu Eigenstromerzeugung hohen Vergütung ins Netz einspeisen unter der Rubrik „WP“ zusammengefasst, da es keine Interaktion zwischen der PV-Erzeugung und dem Wärmepumpenbetrieb gibt.

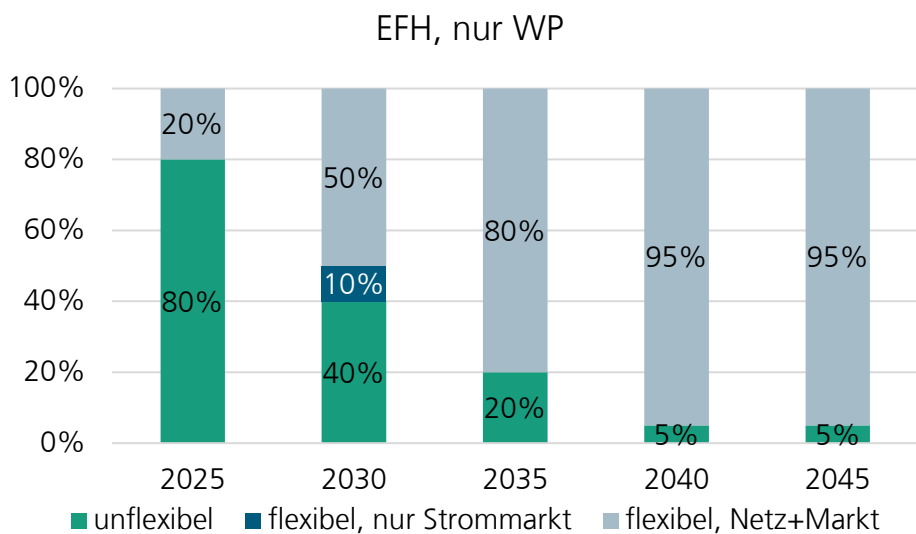


Abbildung 44: Szenario Anteil des Strompreismodells in Einfamilienhäusern mit Wärmepumpe in Deutschland. Unter der Bezeichnung „nur Markt“ sind Anlagen mit festen Netzentgelten, aber dynamischen Strompreisentgelten zusammengefasst, entsprechend der aktuellen Regulierung.

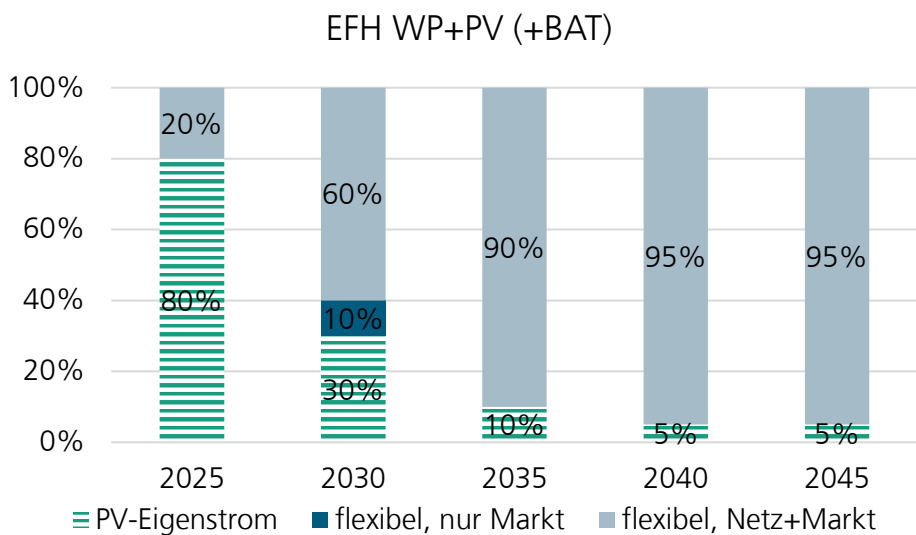


Abbildung 45: Szenario Anteil des Strompreismodells in Einfamilienhäusern mit PV und Wärmepumpe in Deutschland

- Kombiniert man den Hochlauf des Anteils der Wärmepumpen mit der Entwicklung der Anteile der Systeme mit und ohne PV bzw. Batteriespeicher und dem Szenario zu den Anteilen des gewählten Tarifs, kommt man zu den in Abbildung 46, Abbildung 47 und Abbildung 48 gezeigten Wärmepumpensystemen in Deutschland.

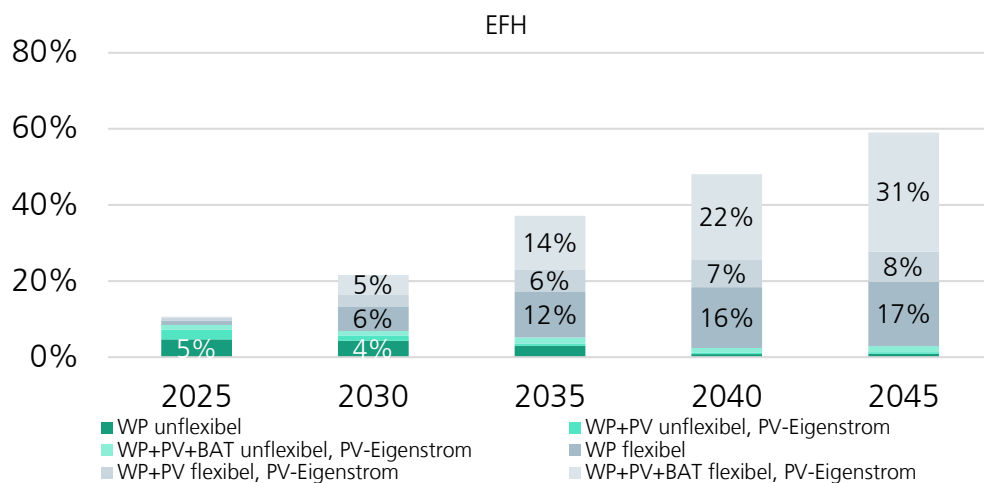


Abbildung 46: Anteil an Einfamilienhäusern in Deutschland, differenziert nach technischer Ausstattung und Strompreismodell.

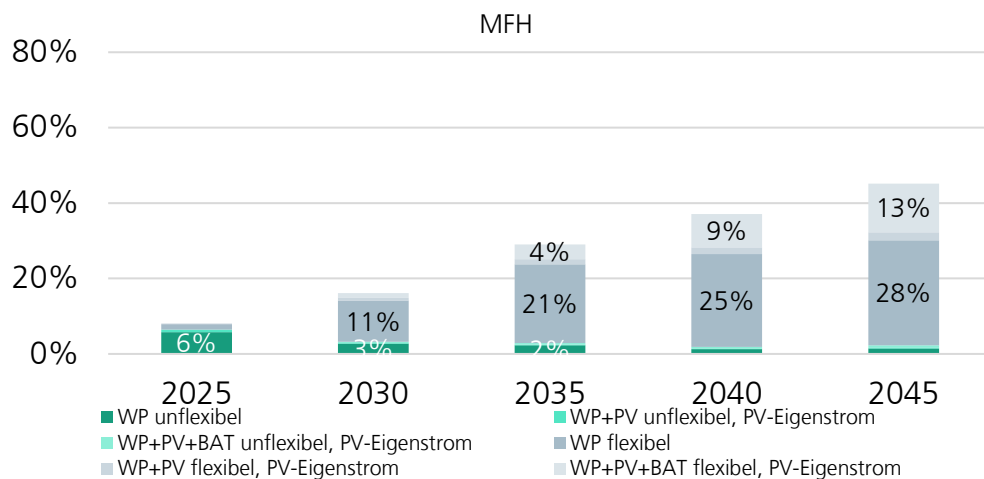


Abbildung 47: Anteil an Einfamilienhäusern in Deutschland, differenziert nach technischer Ausstattung und Strompreismodell.

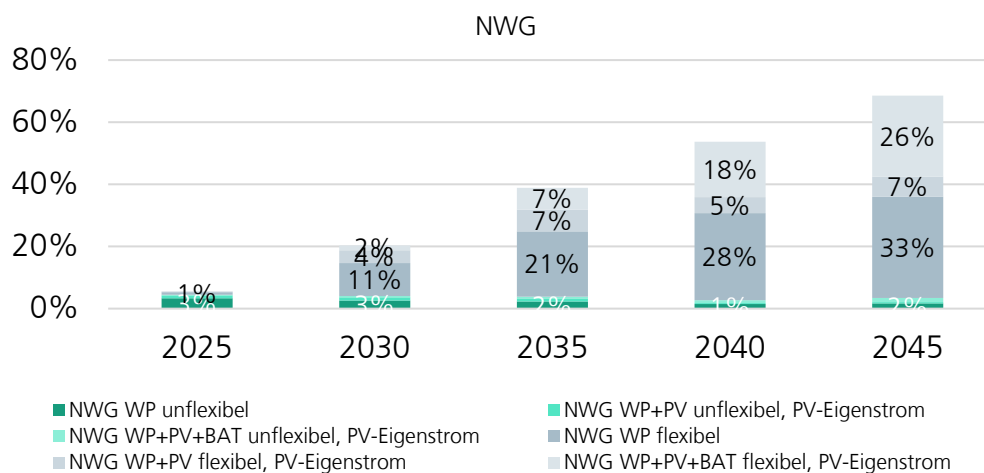


Abbildung 48: Anteil an Einfamilienhäusern in Deutschland, differenziert nach technischer Ausstattung und Strompreismodell.

Literatur

- Phillips, 2025 Photovoltaics Report Dr. Simon Philipps, Fraunhofer ISE und Werner Warmuth, PSE Projects GmbH | Fassung vom 29. Mai 2025 basierend auf Marktstammdatenregister- MaStR (Date: 01.04.2024)
- Winter, 2001 Untersuchungen der Gleichzeitigkeit in kleinen und mittleren Nahwärmernetzen, Euroheat & Power, 2001
- DIN EN 12831 Energetische Bewertung von Gebäuden - Verfahren zur Berechnung der Norm-Heizlast, 2025
- DIN EN 14511 Luftkonditionierer, Flüssigkeitskühlsätze und Wärmepumpen für die Raumbeheizung und -kühlung und Prozesskühler mit elektrisch angetriebenen Verdichtern
- DIN EN 14825 Luftkonditionierer, Flüssigkeitskühlsätze und Wärmepumpen mit elektrisch angetriebenen Verdichtern zur Raumbeheizung und -kühlung, gewerblichen Kühlung und Prozesskühlung - Prüfung und Leistungsbewertung unter Teillastbedingungen und Berechnung der saisonalen Arbeitszahl; Deutsche Fassung EN 14825:2022
- NIBE <https://www.nibe.eu/de-de/produkte/waermepumpen/luft-wasser-waermepumpen/>
- SWM <https://www.swm-infrastruktur.de/strom/netzzugang/bedingungen/waermepumpe>
- Fischer 2017 David Fischer, Tobias Wolf, Jeannette Wapler, Raphael Hollinger, Hatef Madani, "Model-based flexibility assessment of a residential heat pump pool", Energy, Volume 118, 2017, 853-864, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.10.111>
- Ariadne 2025 G. Luderer et al. (2025): Die Energiewende kosteneffizient gestalten: Szenarien zur Klimaneutralität 2045. Kopernikus-Projekt Ariadne, Potsdam. <https://doi.org/10.48485/pik.2025.003>
- WuW 2023 Frondel, M. et al. (2023). Wärme- und Wohnen-Panel - Welle 1 [Data set]. In *German Heating and Housing Panel* (Version 1.0.2). RWI – Leibniz Institute for Economic Research. <https://doi.org/10.7807/ghhp:building:v1>
- IEE&ISE 2025 Gerhardt N. et al. Studie zur Gleichzeitigkeitsfaktoren im Netzgebiet der Stadtwerke München, Fraunhofer IEE und Fraunhofer ISE 2025, <https://doi.org/10.24406/publica-7899>
- NEP 2025 Netzentwicklungsplan 2025, https://www.netzentwicklungsplan.de/sites/default/files/2025-11/Endbericht_RegionalisierungGebaudewaerme_FfE.pdf