

WÄRMEPUMPENSTUDIE

Lastprofile und Gleichzeitigkeitsfaktoren von Wärmepumpenkollektiven sowie Flexibilitätseffekte

WÄRMEPUMPENSTUDIE

Lastprofile und Gleichzeitigkeitsfaktoren von Wärmepumpenkollektiven sowie Flexibilitätseffekte

Dr.-Ing. Michael Krause, Norman Gerhardt, Pedro Giron, Dr. Juan Rodriguez

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

Sebastian Herkel, Mu Huang

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

beauftragt durch:
Stadtwerke München
Emmy-Noether-Straße 2
80992 München
Inhaltliche Bearbeitung: **Dr.-Ing. Martin Zapf**

Datum: 16.02.2026

Zitierhinweis:

Krause, M., Gerhardt, N., Herkel, S., Huang, M., & Zapf, M., et al. (2026). Wärmepumpenstudie: Lastprofile und Gleichzeitigkeitsfaktoren von Wärmepumpenkollektiven sowie Flexibilitätseffekte. Fraunhofer IEE & Fraunhofer ISE. Beauftragt durch Stadtwerke München.

1	ZUSAMMENFASSUNG	4
2	EINLEITUNG	7
2.1	HINTERGRUND	7
2.2	ZIELE UND VORGEHENSWEISE DER STUDIE.....	8
2.3	STRUKTUR DER STUDIE	10
3	ALLGEMEINE ZUSAMMENHÄNGE ZUR GLEICHZEITIGKEIT VON WÄRMEPUMPEN ..	11
3.1	CHARAKTERISTIK DER GLEICHZEITIGKEIT BEI WÄRMEPUMPEN	11
3.2	GRUNDLAGEN ZUR AUSLEGUNG UND SYSTEMDESIGN VON WÄRMEPUMPEN.....	13
3.2.1	<i>Wärmepumpeneffizienz</i>	13
3.2.2	<i>Definition der Bemessungsleistung / Nennleistung</i>	14
3.2.3	<i>Bivalenzpunkt und Systemdesign</i>	17
3.2.4	<i>Anwendbarkeit der Gleichzeitigkeitsfunktionen</i>	19
4	VERWENDETER DATENPOOL	21
5	BETRIEBSVERHALTEN VON WÄRMEPUMPEN.....	25
5.1.1	<i>Betrachtung von Einzelanlagen</i>	25
5.1.2	<i>Clusterung des Anlagenpools</i>	31
6	SIMULATIONSMODELLE	36
6.1.1	<i>Notwendigkeit von Simulationsdaten zusätzlich zu Messdaten</i>	36
6.1.2	<i>Simulationsmodelle</i>	36
7	TAGESLASTPROFILE	40
7.1	MESSWERTBASIERTE TAGESLASTPROFILE	40
7.2	SIMULATIONSBASIERTE TAGESLASTPROFILE	48
8	GLEICHZEITIGKEITSFUNKTIONEN	53
8.1	MESSWERTBASIERTE GLEICHZEITIGKEITSFUNKTIONEN.....	53
8.2	SIMULATIONSBASIERTE GLEICHZEITIGKEITSFUNKTIONEN.....	56
9	FLEXIBLER BETRIEB VON WÄRMEPUMPEN	62
9.1	STAND DER TECHNIK UND TECHNISCHE MINDESTAUSSTATTUNG ZUR FLEXIBILISIERUNG	62
9.1.1	<i>Potenzial und Betrieb</i>	62
9.1.2	<i>Flexibilitätsoptionen</i>	64
9.2	BEWERTUNG DER FLEXIBILISIERUNG VON WÄRMEPUMPEN	67
9.2.1	<i>Prämissen</i>	67
9.2.2	<i>Flexibles Betriebsverhalten von Wärmepumpen</i>	71
9.2.3	<i>Einfluss des flexiblen Betriebs auf die Gleichzeitigkeit von Wärmepumpen</i> ..	75
9.2.4	<i>Wirtschaftlichkeit des flexiblen Betriebs von Wärmepumpen</i>	77
9.3	ERGEBNISÜBERSICHT ZUR FLEXIBILITÄT	79
1 0	LITERATUR	81

Mit dem zu erwartenden Hochlauf von Wärmepumpen und anderen elektrischen Lasten im Zuge der Energiewende steigt die Gesamtlast im Stromnetz. Netzbetreiber müssen diese Entwicklung bei der Netzplanung berücksichtigen. Bei der Bewertung des Einflusses von Wärmepumpen auf das Stromsystem ist zwischen dem Betriebsverhalten einzelner Wärmepumpen sowie dem Verhalten eines großen Pools an Wärmepumpen zu unterscheiden. Auch wenn Wärmepumpen zur Raumheizung in ihrem Betriebsverhalten und ihrer Leistungsaufnahme vor allem durch die Außentemperatur beeinflusst werden, können bei einzelnen Wärmepumpen sehr unterschiedliche Betriebszustände auftreten. Für einen Pool an Wärmepumpen erfolgt typischerweise eine Mittelung, die zu charakteristischen Tagesgängen führt. Auch bei der Betrachtung der Höchstlast ergeben sich bei einem Pool von Wärmepumpen Mittelungseffekte, die mit Gleichzeitigkeitsfaktoren bzw. Gleichzeitigkeitsfunktionen beschrieben werden können. Für den zukünftigen Betrieb von Wärmepumpen ist zudem zu erwarten, dass eine gewisse Zahl an Kunden auf externe Signale, wie z.B. dynamische Stromtarife oder auch dynamische Netzentgelte, reagieren werden, was zu einem veränderten Betriebsverhalten sowohl von einzelnen Anlagen als auch eines gesamten Pools an Wärmepumpen in einem Netzgebiet führen wird.

Im ersten Schritt dieser Studie wurden auf Grundlage von Messdaten die wesentlichen Einflussfaktoren auf das Betriebsverhalten von Wärmepumpen identifiziert. Durch ein geeignetes Clustering des untersuchten Anlagenpools erfolgte anschließend die Ableitung temperaturabhängiger Tageslastgänge – sowohl für den Gesamtpool als auch differenziert nach den identifizierten Einflussgrößen. Aus der Messdatenauswertung wurden zudem Eingangsdaten für Simulationsmodelle generiert. Mit deren Hilfe konnten die Lastgänge an die spezifischen Rahmenbedingungen des Stadtgebiets München angepasst werden. Darüber hinaus wurden für die typischen Auslegungstemperaturen im Münchner Raum Gleichzeitigkeitsfunktionen bestimmt, wiederum sowohl für den Gesamtpool als auch für einzelne Wärmepumpencluster. Darauf aufbauend wurden die Simulationsmodelle genutzt, um die potenziellen Auswirkungen einer Flexibilitätserschließung zu analysieren. Dabei flossen unterschiedliche Annahmen zu zukünftigen Preisentwicklungen sowie mögliche technische Optionen in die Bewertung ein.

Für die Studie wurde ein großer Satz an **Betriebsdaten von Wärmepumpenanlagen des Herstellers Stiebel-Eltron** verwendet. Bezüglich in Deutschland installierter Anlagen besteht dieser aus ca. 6.600 Luft-Wasser-Wärmepumpen (LW-WP) in überwiegend Monoblockbauweise, ca. 1.300 LW-WP eines Kompaktgeräte-Typs, der aufgrund des integrierten zentralen Lüftungsgeräts vor allem im Neubau eingesetzt wird, sowie ca. 800 Sole-Wasser-Wärmepumpen (SW-WP). Zur Absicherung der Ergebnisse dieser Daten, die sich rein auf die zum Betrieb benötigte, im System verbaute Sensorik der Wärmepumpen stützen, wurde ein **Messdatensatz aus dem wissenschaftlichen Monitoringprojekt »WPQS im Bestand«** bestehend aus 52 LW-WP sowie 14 SW-WP genutzt.

Für die Simulationen wurde die **Simulationsumgebung TRNSYS** für die dynamische Abbildung der Wärmelast des Gebäudes und das **IEE-Model microScope** für die Abbildung des Anlagenbetriebs verwendet. Bezüglich der Gebäudemodelle wurden verschiedene Gebäudetypen (Baualter, Nutzungstyp) mit unterschiedlichen Effizienzstandards umgesetzt und mit unterschiedlichen Nutzungsverhalten und stochastischen Trinkwasserprofilen kombiniert. Bei der Anlagenmodellierung wurden sowohl **LW-WP als auch – speziell für den Standort München – Wasser-Wasser-Wärmepumpen (WW-WP)** abgebildet. Für alle Modellvarianten wurden vier unterschiedliche Varianten der Parametrierung des Bivalenzpunktes umgesetzt, die anhand der Messdatenauswertung abgeleitet wurden,

um die heutige Dimensionierungspraxis zu berücksichtigen. Sowohl für den regelbasierten als auch den flexiblen Betrieb von Wärmepumpen wurden **Jahressimulationen für den Standort München auf ¼-Stunden-Basis für das gesamte Wetterjahr 2012** durchgeführt, das Tagesmitteltemperaturen von etwa -12 °C über mehrere Tage aufwies.

Alle Lastangaben in dieser Studie sind normiert auf die Nennleistungen im **Prüfpunkt A-7/W55 (Air bzw. Lufttemperatur von -7°C und Water bzw. Temperatur des Heizsystems von 55°C) nach DIN EN 14511 für LW-WP sowie B0/W55 (Brine bzw. Sole von 0 °C) für SW- und WW-Wärmepumpen [1]**, jeweils ohne Berücksichtigung einer möglichen Heizstabileistung. Auch die ermittelten Tageslastgänge und Gleichzeitigkeitsfunktionen beziehen sich entsprechend auf diese Prüfpunkte. Aufgrund der gewählten Normierung können Werte größer als 1 auftreten, da die zugrunde liegenden Prüfpunkte nicht die maximal mögliche Leistung der Wärmepumpen einschließlich der Heizstäbe abbilden.

Als zentrales Ergebnis der Betriebsdatenanalyse zeigte sich, dass ein **Großteil** der in Deutschland installierten Anlagen **so dimensioniert ist, dass selbst an kalten Tagen kein oder nur ein minimaler Heizstabeinsatz erforderlich ist und die Anlagen somit oftmals monovalent betrieben werden**. Insgesamt fällt durch die heutige Dimensionierungspraxis die elektrische Last eines Wärmepumpenpools an kalten Tagen geringer aus, als es sowohl auf Basis der installierten Leistung als auch der Heizlast der versorgten Gebäude zu erwarten wäre.

In den entwickelten Tageslastprofilen zeigt sich ein stark ausgeprägter Morgenpeak beginnend um ca. 6 Uhr und ein niedriger Abendpeak um ca. 19 Uhr. In den Nachtstunden sind deutlich reduzierte elektrische Lasten zu beobachten.

In Bezug auf die Gleichzeitigkeit wurde festgestellt, dass für einen Pool von LW-WP in Ein- und Zweifamilienhäusern (EZFH) ein Gleichzeitigkeitsfaktor von etwa 1,1 gilt. Dieser Wert trifft auf einen Pool von mindestens 400 Anlagen zu; ab dieser Anlagenanzahl sinkt der Gleichzeitigkeitsfaktor kaum noch ab. Für einen WW-WP-Pool in EZFH konnte ein Gleichzeitigkeitsfaktor von 0,8 ermittelt werden. Die Werte für kleine Mehrfamilienhäuser liegen mit 1,0 nahezu gleich für LW-WP und WW-WP. Alle genannten Werte berücksichtigen den Einsatz von Heizstäben. Bei der Interpretation der zuvor genannten Werte ist zu beachten, dass die elektrische Gesamtlast eines Pools von WW-WP aufgrund der höheren Effizienz trotz vergleichbarem Gleichzeitigkeitsfaktor signifikant unter der eines LW-WP-Pools liegt.

Zur Untersuchung des Einflusses einer flexiblen Betriebsweise und Anlagenauslegung von Wärmepumpen auf deren Gleichzeitigkeit und Wirtschaftlichkeit wurden Poolsimulationen mit unterschiedlichen Preisanreizen für die Betriebsjahre 2033 und 2045 durchgeführt. Für alle Preiszeitreihen wurden unterschiedliche anlagentechnische Variationen, darunter eine Überdimensionierung von Wärmespeichern sowie der Einsatz von Batteriespeichern, umgesetzt. Als regelungstechnische Variationen wurden Temperaturerhöhungen in den Speichern sowie das bewusste Zulassen von Raumtemperaturabsenkungen betrachtet. Bei den Simulationen zeigte sich, dass über alle Varianten eine flexible Betriebsweise nach dynamischen Tarifen, welche die Börsenstrompreise reflektieren, zu einer Erhöhung der Gleichzeitigkeit führt, da alle Wärmepumpen zum gleichen Zeitpunkt günstige Strompreise ausnutzen. Werden dynamische Netzentgelte in die Preisgestaltung integriert, kann dies theoretisch eine Halbierung der Gleichzeitigkeit und damit der Netzbelastung bewirken. Eine Kombination von Wärmepumpen und Batteriespeichern kann je nach Verhältnis der Leistungen beider Einrichtungen die Gleichzeitigkeit in Reaktion auf Strommarkt-Preissignale stark erhöhen. Werden Strommarktpreise um lokale Signale wie dynamische Netzentgelte ergänzt, könnten Batterien allerdings auch zur Reduzierung der Netzlast beitragen.

Durch die Flexibilisierung des Wärmepumpenbetriebs lassen sich grundsätzlich Kosteneinsparungen erzielen. Diese ergeben sich vor allem durch Energieeffizienzgewinne, die auch ohne dynamische Tarife erzielbar wären, z.B. durch abgesenkte Speichertemperaturen oder Effizienzsteigerungen durch zeitliche Verschiebung des Betriebs der Wärmepumpen hin zu wärmeren Außentemperaturen. Der wirtschaftliche Vorteil der eigentlichen Strompreisoptimierung ist dagegen langfristig gesehen vergleichsweise gering.

Zusammenfassend liefert diese Studie **folgende Erkenntnisse**:

- Tageslastprofile von Wärmepumpen weisen **morgendliche Leistungsspitzen sowie niedrige Leistungsbedarfe nachts und mittags** auf.
- **Relevante Einflussgrößen** auf den Betrieb von Wärmepumpen sind – **neben der Außentemperatur – der Wärmepumpentyp, der Gebäudetyp und die Dimensionierung der Wärmepumpe** (in der heutigen Praxis findet oftmals eine Überdimensionierung statt).
- Die **Gleichzeitigkeit (bei unflexiblen Wärmepumpenbetrieb) liegt bei 1,1 für einen Pool von LW-WP** (normiert auf die Nennleistung im Betriebspunkt A-7/W55) sowie bei **0,8 für einen Pool an WW-WP** (normiert auf die Nennleistung im Betriebspunkt B0/W55); Werte für kleine Mehrfamilienhäuser liegen zwischen den beiden Werten für Ein- und Zweifamilienhäuser.
- Als einfache grobe Faustformel gilt: Bei einer **thermischen Gebäudeheizlast von 10 MW** ergibt sich eine **elektrische Leistungsaufnahme von etwa 4 MW für einen LW-WP-Pool**, während **bei einem WW-WP-Pool rund 2 MW** zu erwarten sind.
- **Strommarktanreize erhöhen die Gleichzeitigkeit und damit die Höchstlast von Wärmepumpen**; durch ein **angepasstes Marktdesign mit lokalen Signalen**, z.B. mit dynamischen Netzentgelten, **könnte jedoch die Last in kritischen Zeiten erheblich reduziert** werden.
- Ohne Berücksichtigung der Netzdienlichkeit ist der **wirtschaftliche Vorteil einer Flexibilitätserschließung** von Wärmepumpen in erster Linie in einem **Effizienzvorteil** zu sehen; **die Strompreisoptimierung** bringt dagegen **langfristig vergleichsweise geringe Kosteneinsparungen**.

Die Erkenntnisse bilden eine wichtige Grundlage für die Berücksichtigung der Netzlast von Wärmepumpen in der Netzausbauplanung, für energiewirtschaftliche Prozesse wie Bilanzierung und Stromeinkauf sowie für die Auslegung von Wärmepumpen unter Einbeziehung eines zukünftig möglichen flexiblen Betriebs. Die Studie liefert repräsentative Gleichzeitigkeitsfaktoren und Tageslastprofile und zeigt Flexibilitätseffekte auf. Die Ergebnisse stützen sich auf umfangreiche Messdaten und detaillierte Simulationen, um eine hohe Belastbarkeit und Praxisnähe sicherzustellen.

2 Einleitung

2.1 Hintergrund

Mit dem zu erwartenden Hochlauf von Wärmepumpen und anderen elektrischen Lasten im Zuge der Energiewende resultiert eine zunehmende Gesamtlast im Stromnetz, die Netzbetreiber in der Netzplanung berücksichtigen müssen. Für die Ermittlung der Netzlast greifen Netzbetreiber typischerweise auf Gleichzeitigkeitsfaktoren bzw. Gleichzeitigkeitsfunktionen zurück. Eine Gleichzeitigkeitsfunktion beschreibt das Verhältnis zwischen der gleichzeitigen Gesamtbezugsleistung aus dem Netz und der Bemessungs- bzw. Nennleistung bestimmter Verbraucher in Abhängigkeit von deren Anzahl. Ein Wert der Gleichzeitigkeitsfunktion wird als Gleichzeitigkeitsfaktor bezeichnet. Mit zunehmender Kollektivgröße nimmt die Wahrscheinlichkeit ab, dass Verbraucher gleichzeitig Strom aus dem Netz beziehen, wodurch der Gleichzeitigkeitsfaktor mit zunehmender Kollektivgröße absinkt.

Für Wärmepumpen kann erwartet werden, dass im Vergleich zu Ladevorgängen von Elektrofahrzeugen höhere Gleichzeitigkeiten auftreten, da ihr Betrieb stark durch lokale und jahreszeitliche Wetterbedingungen bestimmt ist. Allerdings fehlen zum heutigen Stand messwertbasierte Analysen zur Gleichzeitigkeit von Wärmepumpenkollektiven als Grundlage für den auslegungsrelevanten Fall in der Stromnetzplanung. Aufgrund der unterschiedlichen Eigenschaften der einzelnen Wärmepumpenanlagen (z. B. Typ, Größe, Effizienz oder Regelung), der Gebäude (z. B. Fläche oder energetischer Zustand) und der Nutzer (z. B. Anzahl der Bewohner oder Heizverhalten) wirkt sich zudem die Zusammensetzung eines Wärmepumpenkollektivs signifikant auf die Gleichzeitigkeit aus. Es ist daher erforderlich, die wesentlichen Einflussfaktoren zu identifizieren und die Gleichzeitigkeit differenziert auszuweisen.

Innerhalb dieser Studie wird zwischen der »natürlichen« und »künstlichen« Gleichzeitigkeit unterschieden. Unter der natürlichen Gleichzeitigkeit definiert sich hier ein Gleichzeitigkeitsfaktor für den ungesteuerten Stromverbrauch, der sich aus dem bedarfsorientierten Verhalten der Nutzer – ohne Reaktion auf (Preis-)Anreize oder steuernde externe Eingriffe – ergibt. Da zukünftig die Zahl an Kunden steigen wird, die ihren Stromverbrauch in Abhängigkeit von Preisanreizen bzw. der Verfügbarkeit von (erneuerbaren) Erzeugungsleistungen und der Netzkapazität anpassen, bedarf es zudem Analysen, wie sich die Flexibilität von Wärmepumpen auf die Gleichzeitigkeit des Strombezugs aus dem Netz auswirkt. Eine durch (Preis-)Anreize oder steuernde externe Eingriffe beeinflusste Gleichzeitigkeit wird hier als künstliche Gleichzeitigkeit bezeichnet. Die zuvor dargelegten Forschungslücken sollen mit dieser Studie geschlossen werden.

Neben der Gleichzeitigkeit im Höchstlastfall für die Netzauslegung ist beispielsweise für Fragen des Bilanzkreismanagements die zeitliche Verteilung des Strombezugs von Wärmepumpen wichtig. Das typische Verfahren hierfür ist die Verwendung von außertemperaturabhängigen Standardlastprofilen, die Versorger ansetzen. 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.

2.2 Ziele und Vorgehensweise der Studie

Ein wesentliches Ziel dieser Studie war die Bestimmung der Gleichzeitigkeit des Strombezugs von Wärmepumpenkollektiven unter Nutzung von Messdaten. Dafür war es erforderlich, die zugrunde liegenden Abhängigkeiten zu berücksichtigen, insbesondere die temperaturabhängige Betriebscharakteristik von Wärmepumpen. Zu Beginn der Studie entwickelten die Studienautoren eine Methodik zur Analyse der einzelnen Datensätze, um die an unterschiedlichen Standorten und damit unter unterschiedlichen Wetterrandbedingungen erhobenen Datensätze synchronisieren zu können.

Für das Analysieren der Effekte des Vollastbetriebs und damit insbesondere des Heizstabbetriebs stellte der umfangreiche Datensatz der Fa. Stiebel-Eltron von ca. 8.700 Anlagen verschiedener Wärmepumpentypen eine hervorragende Grundlage dar. Die Charakteristik des Datensatzes erforderte aber die Entwicklung bzw. Anwendung von modellhaften sowie statistischen Methoden zur Erarbeitung von Gleichzeitigkeitsfaktoren für Wärmepumpenkollektive, bei denen die Betriebs- und Systemrandbedingungen Variablen darstellen:

- Für die in einer Rohfassung vorliegenden Betriebsdaten erfolgten Plausibilitätskontrollen, ein Handling von Datenlücken sowie die Anwendung von Routinen zur Synchronisierung der Zeitreihen im Hinblick auf die zeitliche Auflösung.
- Auf Basis von Meta-Informationen zur Wärmepumpentechnologie und geografischen Lage (DSGVO-konform) sowie unter Verwendung von Cluster- und Korrelationsanalysen wurden die Daten über die Definition der Auslegungstemperatur am jeweiligen Standort der Anlage auf eine einheitliche Wettercharakteristik (Definition ähnlicher Tage) im Hinblick auf den Standort München aggregiert, um lokale Gleichzeitigkeiten bestimmen zu können.
- In den Messdaten fanden sich nur eine begrenzte Anzahl sehr kalter Tage (Außentemperaturen kleiner -5°C). Da gemäßigte Außentemperaturen meist noch nicht für die Netzauslegung relevant sind, mussten die Messdaten über Gebäudesimulation auf kältere Tage extrapoliert werden. Um die Netzlast der Wärmepumpen im Verteilnetz für den Auslegungsfall abschätzen zu können, wurden Modellfunktionen entwickelt, die aus den Betriebsdaten der einzelnen Wärmepumpen extrahiert wurden.
- Für die Identifikation von zentralen Zusammenhängen (Gebäudetyp, Heizlast, Wärmepumpentyp, Standort) war eine gebäudescharfe Zuordnung der Stiebel-Eltron-Betriebsdaten erforderlich. Hierzu wurden georeferenzierte Gebäude- und Nutzerdaten aus dem Datenpool des Fraunhofer IEE verwendet, die mit den Betriebsdaten verschnitten wurden.

Der Datensatz des Monitoringprojekts WPQS des Fraunhofer ISE, der ebenfalls als Grundlage für die Studie herangezogen wurde, umfasst Wärmepumpenanlagen unterschiedlicher Baujahre (2005–2023), sowie verschiedener Anlagendesigns, Gebäudestandards und geografischer Lagen. Für viele dieser Anlagen lagen 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 konnten die Messdaten mit den jeweiligen Randbedingungen verschnitten werden. Dies ermöglichte es, Zusammenhänge zwischen den Einsatzbedingungen, der Auslegung und den Betriebskenndaten aufzuzeigen und die Messdaten u.a. hinsichtlich folgender Aspekte auszuwerten:

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

Diese Erkenntnisse wurden zur Parametrierung und Validierung der Simulationsmodelle sowie zur Entwicklung der Gleichzeitigkeitsfunktionen herangezogen.

Für die Entwicklung der Gleichzeitigkeitsfunktionen für den Auslegungsfall – unter Berücksichtigung relevanter Einflussfaktoren – wurden Simulationsmodelle von Typgebäuden verwendet. Relevante Einflussgrößen auf die Gleichzeitigkeit wurden anhand der Messdatenanalyse identifiziert und in die Modelle integriert. Die Simulationsmodelle wurden dabei an den verwendeten Messdaten kalibriert und um eine funktionale Beschreibung der übergeordneten Gleichzeitigkeit ergänzt. Mithilfe der erstellten Modelle wurden stochastisch verteilte Reihensimulationen durchgeführt, mit denen die Sensitivitäten der Gleichzeitigkeit ermittelt wurden. Dafür wurde vom Fraunhofer IEE eine Modellkopplung zwischen TRNSYS (Wärmenachfrage) und microSCOPE (Anlageneinsatz- und Optimierungsmodell) eingesetzt, um eine sehr große Anzahl von Gebäudetypen, Nutzereigenschaften und Wärmepumpenauslegungen zu simulieren.

Anhand der entwickelten Simulationsmodelle wurden zudem temperaturabhängige synthetische Tageslastprofile in Abhängigkeit der zentralen Einflussparameter erstellt, insbesondere aber in Abhängigkeit der Außentemperatur. Die notwendige Anzahl der zu ermittelnden und aggregierten 15-Minuten-Tagessätze erfolgte auf Basis der Sensitivitätsanalysen zu den Einflussfaktoren.

Neben der Gleichzeitigkeit, die sich bei heutiger unflexibler Betriebsweise von Wärmepumpen ergibt, ist durch Strommarktpreisanreize zukünftig auch von einer weiteren Erhöhung der Gleichzeitigkeit auszugehen. Gleichzeitig könnte die Flexibilität auch genutzt werden, um z. B. über dynamische Netzentgelte den Netzausbaubedarf zu begrenzen. Für die Bewertung der Flexibilitätseffekte wurde das Modell investSCOPE zur Minimierung der Wärmepumpen-Stromkosten eingesetzt. Eingangsdaten waren hierfür zukünftige Strompreiszeitreihen aus dem europäischen Strommarktmodell SCOPE-EM des Fraunhofer IEE sowie dynamische Netzentgelte in definierten Hochlastzeitfenstern für eine beispielhafte Ortsnetzstation und ein Umspannwerk. Für die Bemessung dieser Hochlastzeitfenster wurde auf Arbeiten des Fraunhofer IEE zu Zielnetzplanungen gemäß § 14d EnWG zurückgegriffen.

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

- Eingangs werden die allgemeinen Zusammenhänge bei der Auslegung und dem Betrieb von Wärmepumpen sowie die Auswirkungen auf die Gleichzeitigkeit erläutert. Dabei wird eine Normierung der elektrischen Bemessungsleistung eingeführt, die es ermöglicht, die Heterogenität zwischen installierter thermischer Leistung und eingesetzter elektrischer Leistung inklusive Heizstab zu berücksichtigen. Sie kann sowohl bei der Anmeldung von Wärmepumpen (Typenschild-Angaben für § 14a-Anmeldung) als auch bei der langfristigen Netzausplanung mit Szenarien zur Verbreitung von Wärmepumpen genutzt werden (Zielszenarien gemäß § 14d).
- Die vorhandenen Messdaten und ihre Restriktionen für die Auswertung werden erläutert, z. B. die begrenzte Aussagefähigkeit für Tagesmitteltemperaturen unter -5 °C .
- Die Messdatenauswertung für Luft-Wasser-Wärmepumpen im Ein- und Zweifamilienhaus wird dargelegt – sowohl für Einzelanlagen als auch für den gesamten Anlagenpool. Die empirischen Daten bilden den Benchmark für unflexible Wärmepumpen bei Tagesmittelwerten von $+12\text{ °C}$ bis -5 °C .
- Die Simulationsmodelle für die Extrapolation bis -12 °C werden erläutert und für Luft-Wasser-Wärmepumpen evaluiert.
- Tageslastprofile und Gleichzeitigkeitsfunktionen anhand der Mess- und Simulationsdaten werden dargelegt. Für Mehrfamilienhäuser und Bürogebäude sowie Wasser-Wasser-Wärmepumpen basieren diese – mangels ausreichender Messdaten – ausschließlich auf Simulationen.
- Abschließend werden Simulationsergebnisse für einen möglichen zukünftigen flexiblen Betrieb nach Strommarktpreissignalen und dynamischen Netzentgelten aufgezeigt. Darauf aufbauend werden die Auswirkungen des flexiblen Betriebs im Vergleich zum heutigen unflexiblen Betrieb im Hinblick auf die Gleichzeitigkeit und Wirtschaftlichkeit bewertet.

3

Allgemeine Zusammenhänge zur Gleichzeitigkeit von Wärmepumpen

3.1

Charakteristik der Gleichzeitigkeit bei Wärmepumpen

Ein Gleichzeitigkeitsfaktor ist definiert als Quotient aus dem Maximalwert der Summe der zeitgleich abgerufenen Leistungen der betrachteten Einzelverbraucher und der Summe ihrer jeweiligen Bemessungsleistungen bzw. installierten Nennleistungen:

$$GLF = \frac{\sum_{i=1}^m P_i(t_{MAX})}{\sum_{i=1}^m P_{N,i}}$$

GLF = Gleichzeitigkeitsfaktor

$P_{N,i}$ = Nennleistung des i -ten Anschlusses

m = Gesamtzahl der Anschlüsse

t_{MAX} = Zeitpunkt, zu dem die Summe der Einzelleistungen aller Anschlüsse am höchsten ist

$P(t_{MAX})$ = Leistung des i -ten Anschlusses zum Höchstlastzeitpunkt t_{MAX}

Für Wärmeanwendungen (Gebäudewärme und Trinkwarmwasserbereitung) kann erwartet werden, dass im Vergleich zu Ladevorgängen von Elektrofahrzeugen höhere Gleichzeitigkeitsfaktoren bestehen, da sich deren Nutzung stark durch die lokalen Wetterbedingungen synchronisiert. Auf Quartiersebene liegen hierzu jedoch nur wenige messtechnische Untersuchungen vor. In [2] wurde die Gleichzeitigkeit des Leistungsbezugs in zwei Biomasse-Nahwärmenetzen mit jeweils etwa 300 Wärmeabnehmern in Österreich analysiert. Die Näherungsfunktion für den Verlauf des Gleichzeitigkeitsfaktors in Abhängigkeit von der Anzahl der zu versorgenden Abnehmer ist in Abbildung 1 dargestellt.

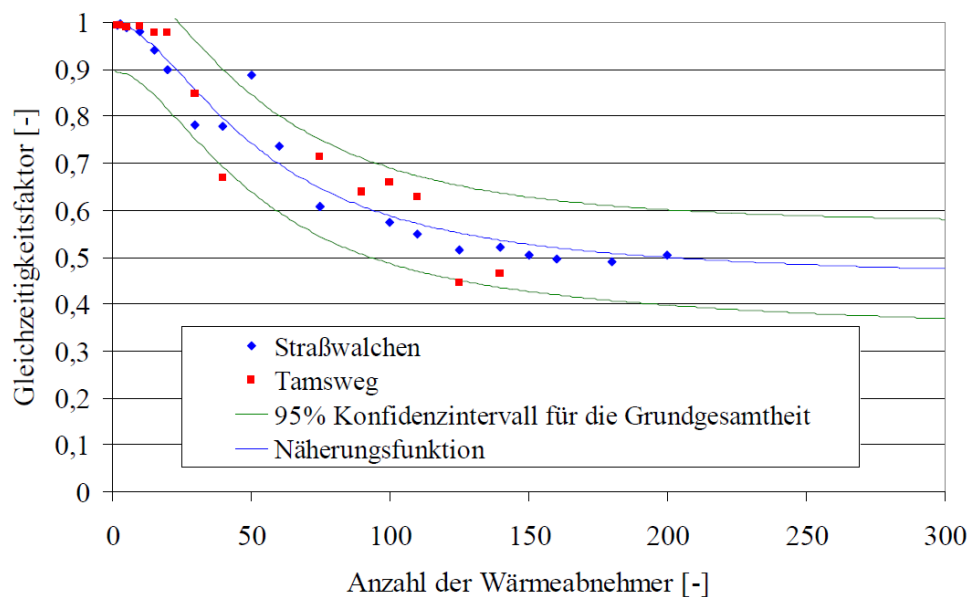


Abbildung 1: Näherungsfunktion der Gleichzeitigkeit zweier Nahwärmenetze nach [2].

Es ist zu erkennen, dass der Gleichzeitigkeitsfaktor – trotz der hohen Korrelation der Wärmeabnahme mit der Außentemperatur – bereits bei einer Abnehmerzahl von rund 50 deutlich unter 1 liegt und bei Abnehmergruppen oberhalb von etwa 200 einen Wert unter 0,5 erreicht. Gründe für diese vergleichsweise niedrigen Werte liegen neben dem Nutzerverhalten und Speichereffekten auch in der Ermittlung der Nennleistung der einzelnen Übergabestationen und deren begrenzter Korrelation mit der tatsächlichen maximalen Gebäudelast.

Diese Einflüsse verstärken sich beim Übergang zu verteilten Wärmepumpen. Dies hat mehrere Gründe:

- Wärmepumpen haben sowohl hinsichtlich ihrer Wärmeleistung als auch hinsichtlich der elektrischen Leistungsaufnahme eine starke Abhängigkeit von der Außentemperatur (LW-WP), Heizkreistemperatur und Trinkwarmwassertemperatur.
- Das Verhalten von Luft-Wasser-WP, Sole-Wasser-WP und Wasser-Wasser-WP unterscheidet sich speziell an kalten Tagen deutlich.
- Wärmespeicher – sowohl für Heizung als auch für Trinkwarmwasser – sorgen für eine Teilkopplung von Wärmeerzeugung und Wärmebedarf.
- Die überwiegende Anzahl der Wärmepumpensysteme wird mit einem zweiten Wärmeerzeuger, i.d.R. einem Heizstab, ausgeführt, der entweder als bivalenter Wärmeerzeuger oder lediglich als Notheizung eingesetzt wird.
- Ältere Wärmepumpen sind oftmals noch Fix-Speed-Anlagen; neuere Wärmepumpensysteme werden überwiegend als modulierende Wärmepumpen mit Invertertechnologie ausgeführt und arbeiten in einem großen Bereich im Teillastbetrieb.
- Die Wahl der Wärmepumpe und damit der installierten Nennleistung obliegt dem Handwerker. Dies betrifft sowohl die Frage eines Bivalenzpunktes als auch die Bestimmung der Heizlast im Normauslegungsfall nach DIN EN 12831 [3].
- Die maximale elektrische Leistungsaufnahme kann aufgrund des Anlaufstroms beim Starten erhöht sein.

Eine wesentliche Grundlage bei der Entwicklung von Gleichzeitigkeitsfaktoren für Wärmepumpenkollektive besteht darin, eine geeignete Nennleistung als Bezugsgröße heranzuziehen. Diese kann deutlich unterhalb der tatsächlich installierten elektrischen Leistung liegen, insbesondere wenn alle installierten Heizstäbe sowie das Anlaufstromverhalten mitberücksichtigt werden. Die hier gewählte Nennleistung wird im Abschnitt 3.2.2 näher beschrieben.

Des Weiteren ist für die Gleichzeitigkeit von Wärmepumpenkollektiven die Auslegungstemperatur am jeweiligen Standort relevant. Deutschlandweit stellt beispielsweise der Bundesverband Wärmepumpen postleitzahlgenaue Auslegungstemperaturen zur Verfügung. Für den Raum München, der in dieser Studie betrachtet wird, liegen diese bei etwa -12 °C .

Aufgrund der unterschiedlichen Eigenschaften einzelner Wärmepumpenanlagen, Gebäude und Nutzer wirkt sich zudem die Zusammensetzung des Wärmepumpenkollektivs signifikant auf die Gleichzeitigkeit aus. Es ist daher erforderlich, die wesentlichen Einflussfaktoren zu identifizieren und die Gleichzeitigkeit differenziert auszuweisen – was in dieser Studie erfolgt.

3.2

Grundlagen zur Auslegung und Systemdesign von Wärmepumpen

3.2.1

Wärmepumpeneffizienz

Die Effizienz einer Wärmepumpe wird maßgeblich durch die vorherrschenden Betriebsbedingungen bestimmt. Ihr Wirkungsgrad (COP: Coefficient of Performance) hängt von den Temperaturniveaus von Wärmequelle (T_{Quelle}) und -senke (T_{Senke}) sowie von den herstellereigenen Modelleigenschaften ab. Entsprechend dem Carnot-Wirkungsgrad kann der COP von Wärmepumpen über die Definition eines Gütegrads beschrieben werden; typische Werte hierfür liegen zwischen 0,4 und 0,5:

$$COP = (0,4 \dots 0,5) \times \frac{(T_{Senke} + 273,15 \text{ K})}{(T_{Senke} - T_{Quelle})}$$

Wie in Abbildung 2 schematisch dargestellt, führt eine Abnahme der Außentemperatur zu steigenden erforderlichen Heizkreistemperaturen und damit zu einem größeren Temperaturhub zwischen Wärmequelle und -senke, was eine Verringerung des COP zur Folge hat. Dieser Effekt wird durch das gleichzeitige Absinken der Quellentemperatur verstärkt – insbesondere bei Luft-Wasser-WP, aber auch bei Sole- und Wasser-Wasser-WP aufgrund der jahreszeitlichen Schwankungen der Erdober- und Grundwassertemperaturen.

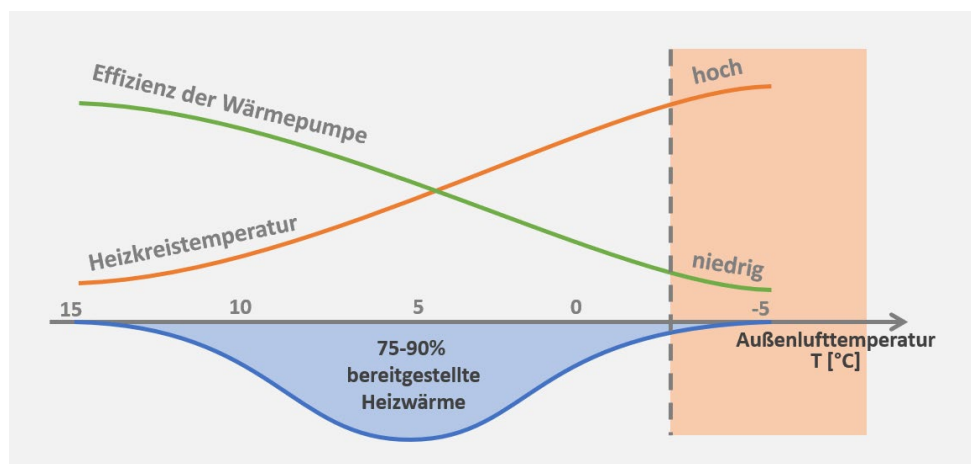


Abbildung 2: Vergleich von Wärmepumpeneffizienz und Heizkreistemperatur in Abhängigkeit von der Außentemperatur (Verteilung der Heizenergie auf die einzelne Temperaturgrade).

Im Bereich niedriger Außentemperaturen treten zudem hohe Gebäudeheizlasten auf, sodass die Wärmepumpen entsprechend hohe Wärmeleistungen bereitstellen müssen. Die Kombination aus niedrigem COP und hoher Heizlast führt bei geringen Außentemperaturen zu hohen elektrischen Leistungsaufnahmen der Wärmepumpen, die bei hohen Gleichzeitigkeiten das Stromnetz signifikant belasten können. Der zusätzliche Einsatz von Heizstäben verstärkt diese Netzbelastung weiter.

Der Extremfall für die Netzbelastung tritt jedoch nur während weniger Stunden im Jahr auf und betrifft somit lediglich einen geringen Anteil der jährlich anfallenden Heizenergie. Der überwiegende Teil der jährlichen Heizwärme (etwa 75–90 %) fällt bei moderaten Außentemperaturen um etwa 5 °C an, sodass Wärmepumpen den Großteil der Heizwärme unter vergleichsweise günstigen Betriebsbedingungen bereitstellen können.

Beispielhaft zeigt Abbildung 3 für Luft-Wasser, Sole-Wasser- und Wasser-Wasser-Wärmepumpen außentemperaturabhängige COP-Werte getrennt für das Heizen und die Trinkwarmwasserbereitung. Zugrunde gelegt sind hierbei über das Jahr schwankende Wärmequellentemperaturen. Im Fall von LW-WP wurden Außenlufttemperaturen verwendet; bei SW-WP wurden über das Jahr variierende Erdreichtemperaturen für einen quasi eingeschwungenen Zustand nach etwa zehn Jahren berücksichtigt; für GW-WP leicht schwankende Grundwassertemperaturen. Hinsichtlich der Wärmesenktemperatur wurden in allen Fällen außentemperaturabhängige Heizkurven angesetzt, sodass der COP für alle Wärmepumpentypen eine ausgeprägte Abhängigkeit von der Außentemperatur aufweist. Für die Trinkwarmwasserbereitung wurde eine konstante TWW-Temperatur von 55 °C angenommen, wodurch sich für SW- und WW-WP nahezu konstante COP-Werte ergeben.

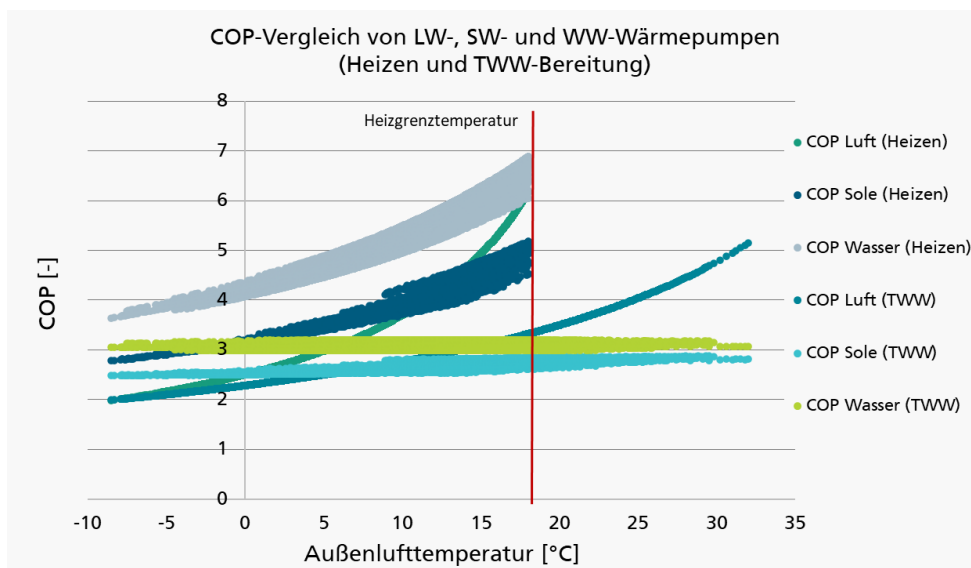


Abbildung 3: Beispielhafte Darstellung der Effizienz von Luft-Wasser, Sole-Wasser- und Wasser-Wasser-WP in Abhängigkeit der Außentemperatur getrennt für Heizwärme und Trinkwarmwasserbereitung. Für das Heizen wurde eine typische Heizkurve für ein Bestandsgebäude angesetzt, für TWW wurden konstant 55°C angenommen.

3.2.2 Definition der Bemessungsleistung / Nennleistung

Für Gleichzeitigkeitsfunktionen und normierte Tageslastgänge von Wärmepumpen ist die Festlegung der Bemessungs- bzw. Nennleistung von entscheidender Bedeutung. Für diese Studie wurde entschieden, Prüfnormen als Grundlage für die Festlegung der Nennleistung heranzuziehen. Die relevanten Normen für Wärmepumpen sind dabei zum einen die DIN EN 14511 und zum anderen die DIN EN 14825, welche die Basis für das ErP-Label bildet. Die grundlegenden Zusammenhänge bei Luft-Wasser-Wärmepumpen zeigen die nachfolgenden Abbildungen.

Abbildung 4 veranschaulicht am Beispiel einer Wärmepumpe der Firma Viessmann die elektrische Leistungsaufnahme gemäß dem Prüfverfahren nach DIN EN 14511. Deutlich zu erkennen ist, dass die elektrische Leistung einerseits mit steigender Heizvorlauftemperatur zunimmt und andererseits bei niedrigen Außentemperaturen ihre Maximalwerte erreicht. Letzteres ist insbesondere darauf zurückzuführen, dass die Wärmepumpe im Prüfverfahren oberhalb von etwa -7 °C im Teillastbetrieb getestet wird und oberhalb von rund +2 °C mit minimaler Verdichterdrehzahl läuft.

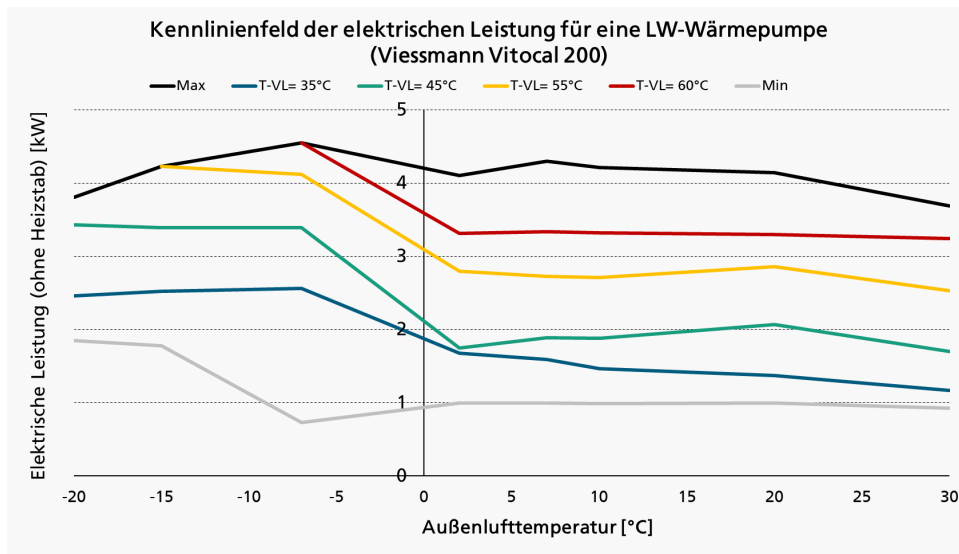


Abbildung 4: Darstellung der elektrischen Leistungsaufnahme im DIN EN 14511 Prüfverfahren für eine Luft-Wasser-Wärmepumpe der Fa. Viessmann.

Mit der Ökodesign-Richtlinie 2009/125/EG wurde ein Rahmen für die Festlegung von Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung energieverbrauchsrelevanter Produkte (engl. energy-related products, ErP) geschaffen, um deren Umweltauswirkungen über den gesamten Lebenszyklus zu verringern. Als Durchführungsmaßnahme der Ökodesign-Richtlinie regelt die Verordnung (EU) Nr. 813/2013, zusammen mit der Verordnung (EU) 811/2013 zur Energiekennzeichnung, die Details zu den Anforderungen für Raumheizgeräte und Kombiheizgeräte. Seit dem 26. September 2015 müssen Produkteigenschaften wie Energieeffizienz und Emissionen, die durch den Betrieb von Wärmepumpen entstehen, EU-weit ausgewiesen und für Installateure und Endnutzer zugänglich gemacht werden. Am 18. Juli 2024 trat die Nachfolge-Richtlinie 2024/1781/EG in Kraft und hebt die Richtlinie 2009/125/EG auf.

Die Energieeffizienz von Wärmepumpen wird in drei Klimazonen ausgewiesen: kältere, durchschnittliche und wärmere Klimaverhältnisse. »Durchschnittliche Klimaverhältnisse« beziehen sich auf die typischen Temperaturbedingungen in Straßburg. Die technische Dokumentation der Wärmepumpen enthält Angaben zur Heizleistung und zur Leistungszahl unter verschiedenen Prüfpunkten, aus denen die elektrische Leistungsaufnahme der Wärmepumpen berechnet werden kann. Die Nennheizleistung der Wärmepumpe für durchschnittliche Klimaverhältnisse wird bei einer Außenlufttemperatur von -10 °C gemessen und muss deklariert werden. Die Leistungszahl zur Nennheizleistung unterliegt jedoch nicht der Deklarationspflicht. Die Teillastbedingungen für durchschnittliche Klimaverhältnisse umfassen eine Außenlufttemperatur von -7 °C , 2 °C , 7 °C und 12 °C . Die Heizleistung bei einer Außenlufttemperatur von -7 °C sollte 88 % der Nennheizleistung betragen, während die Heizleistung bei 12 °C nur 15 % der Nennheizleistung erreichen sollte. Daher ist die berechnete elektrische Leistungsaufnahme bei einer Außenlufttemperatur von -7 °C die höchste unter den vier Teillastbedingungen, die unter Deklarationspflicht stehen. Darüber hinaus werden auch die Heizleistung und die Leistungszahl der Wärmepumpen am Bivalenzpunkt sowie an der Betriebsgrenztemperatur angegeben, deren Auswahl den Herstellern überlassen bleibt.

Die Temperaturbedingungen verschiedener Wärmeträgermedien für die Leistungsbestimmung sind in DIN EN 14825:2019-07 festgelegt [4]. Beispielsweise sollte die Sole-Eintrittstemperatur für Sole-Wasser-Wärmepumpen an allen Prüfpunkten 0 °C betragen, während die Wasser-Eintrittstemperatur am Verdampfer für Wasser-Wasser-

Wärmepumpen 10 °C betragen sollte. In der technischen Dokumentation sind alle Prüfpunkte für Wärmepumpen mit verschiedenen Wärmeträgermedien entsprechend den Außenlufttemperaturbedingungen aufgeführt.

 Allgemeine Zusammenhänge zur
 Gleichzeitigkeit von
 Wärmepumpen

Abbildung 5 zeigt die Heizleistung und die Leistungszahl einer leistungsgeregelten Luft-Wasser-Wärmepumpe an Prüfpunkten für durchschnittliche Klimaverhältnisse und bei Mitteltemperaturanwendung gemäß DIN EN 14825. Der Bivalenzpunkt liegt bei -7 °C, während die Betriebsgrenztemperatur bei -10 °C festgelegt ist. Die Heizleistung der Luftwärmepumpe beträgt bei einer Außenlufttemperatur von -7°C 5,5 kW_{th}, während die Leistungszahl 2.48 beträgt. Die elektrische Bemessungsleistung der Wärmepumpe zur Ermittlung der Gleichzeitigkeit liegt daher bei 2,2 kW_{el}. Es ist zu beachten, dass der Referenzwert nicht die maximale mögliche elektrische Leistungsaufnahme darstellt, sondern die maximale elektrische Leistung, die deklarationspflichtig ist.

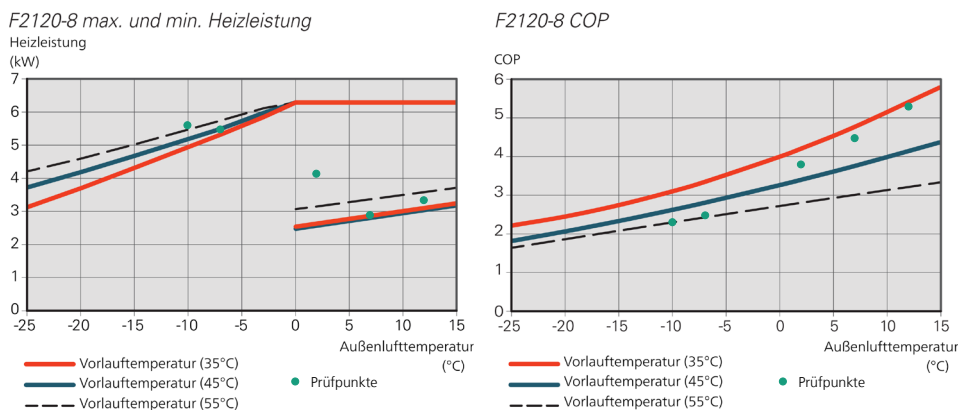
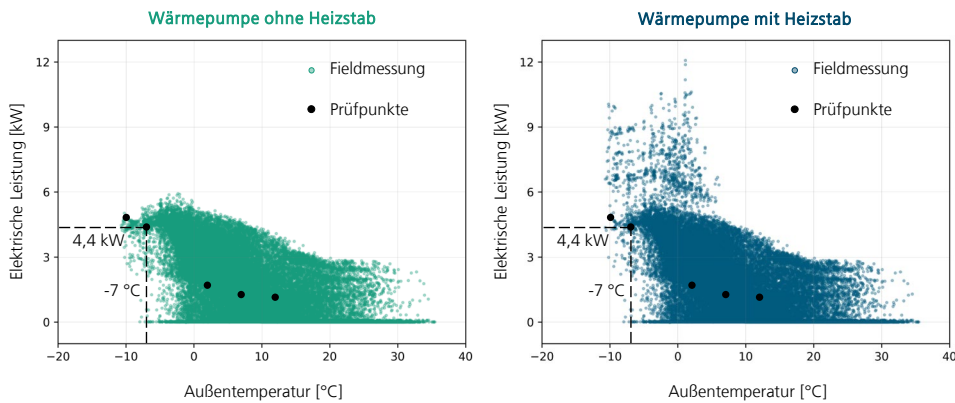


Abbildung 5: Beispielhafte Darstellung der Heizleistung (links) und der Leistungszahl (rechts) einer Luftwärmepumpe an Prüfpunkten bei durchschnittlichen Klimaverhältnissen und Mitteltemperaturanwendung nach [5]. (links) Kennlinien der maximalen und minimalen Heizleistung bei Heizvorlauftemperaturen von 35, 45 und 55°C, (rechts) COP-Kennlinien für COP bei Heizvorlauftemperaturen von 35, 45 und 55°C.

Abbildung 6 zeigt die gemessene 15-minütige mittlere elektrische Leistung einer Luft-Wasser-Wärmepumpe über einen Zeitraum von mehr als drei Jahren sowie die berechneten elektrischen Leistungen an den Prüfpunkten gemäß technischer Dokumentation. Die elektrische Leistungsaufnahme am Prüfpunkt mit einer Außenlufttemperatur von -7 °C beträgt 4,4 kW. Ohne Berücksichtigung von Heizstäben liegen etwa 1,7 % der Messwerte über diesem Referenzwert (mit Abweichungen von bis zu 35 %). Unter Einbeziehung des Heizstab-einsatzes sind es rund 2,9 % der Messwerte (mit maximalen Abweichungen von bis zu 174 % über dem Referenzwert).



Allgemeine Zusammenhänge zur
Gleichzeitigkeit von
Wärmepumpen

Abbildung 6: 15-minütige mittlere elektrische Leistung einer Luft-Wasser-Wärmepumpe ohne (links) und mit (rechts) Heizstab vom 25.02.2021 bis zum 31.07.2024 aus einer Feldmessung sowie die berechnete elektrische Leistung an den Prüfpunkten.

In dieser Studie wird die elektrische Leistungsaufnahme von Luft-Wasser-Wärmepumpen bei -7 °C Außenlufttemperatur und einer Heizvorlauftemperatur von 55 °C als Referenz für die Bemessungs- bzw. Nennleistung verwendet (Prüfpunkt A-7/W55). Der gewählte Betriebspunkt trägt dem Umstand Rechnung, dass ein Großteil der Gebäude in Deutschland im Auslegungsfall Heizungsvorlauftemperaturen von 55 °C und höher benötigt und dass Wärmepumpen im Prüfverfahren bei -7 °C in der Regel nahe ihrer maximalen Verdichterdrehzahl betrieben werden. Für Sole-Wasser- und Wasser-Wasser-Wärmepumpen wird der Prüfpunkt B0/W55 hier verwendet. Durch die gewählte Definition der Nennleistungen kann es im Einzelfall zu normierten Leistungen (sowohl elektrisch als auch thermisch) von über 1 kommen. Auch die resultierenden Gleichzeitigkeitsfaktoren können Werte oberhalb von 1 annehmen.

3.2.3 Bivalenzpunkt und Systemdesign

Bivalent ausgeführte und betriebene Wärmepumpensysteme können einen großen Einfluss auf die elektrische Leistungsaufnahme an kalten Tagen und damit auf den Gleichzeitigkeitsfaktor haben. Ist ein zweiter Wärmeerzeuger beispielsweise als Biomasse- oder klassischer Gaskessel ausgeführt, kann dies zu einer Verringerung der elektrischen Leistung an kalten Tagen führen. Wird dagegen ein elektrischer Heizstab verwendet (Mehrzahl der Anlagen), kann dies zu einem enormen Anstieg der elektrischen Leistungsaufnahme führen. Die typischen Betriebsweisen von bivalenten Systemen mit Wärmepumpen zeigt Abbildung 7.

Allgemeine Zusammenhänge zur Gleichzeitigkeit von Wärmepumpen

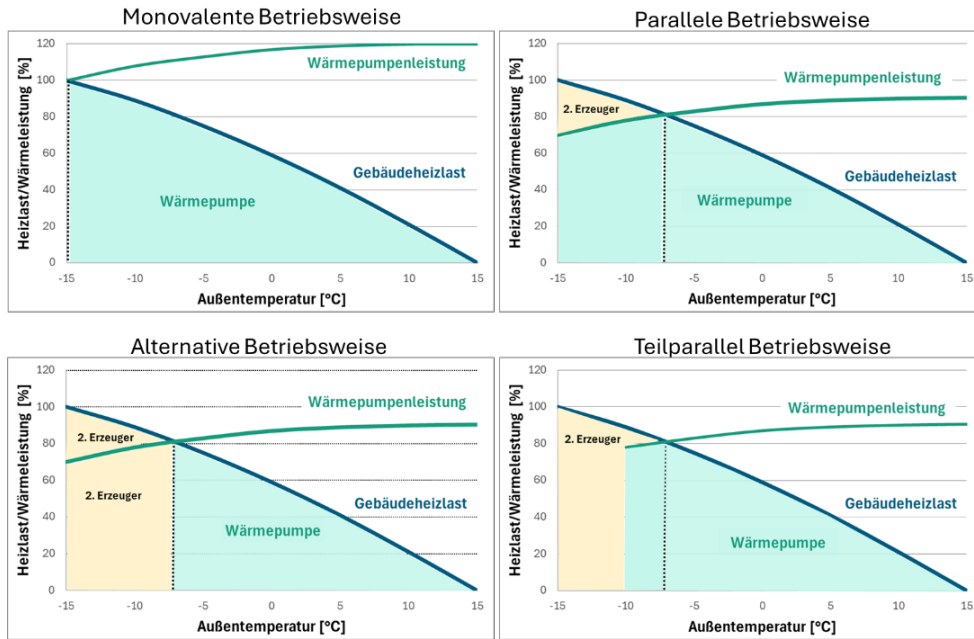


Abbildung 7: Monovalente sowie drei verschiedene bivalente Betriebsweisen von Wärmepumpen. Die Monovalente und parallele Betriebsweise mit Heizstab (oben) dominieren den Markt.

Für die bivalente parallele Betriebsweise einer Wärmepumpe mit Heizstab zeigt Abbildung 8 den Zusammenhang zwischen der benötigten Heizstabelleistung im Auslegungsfall und für drei unterschiedliche Bivalenzpunkte bei einer festen Gebäudeheizlast (9,4 kW bei -12°C Außentemperatur). Im Fall der Nutzung eines zweiten Energieträgers ändert sich die elektrische Nennleistung bis zum Bivalenzpunkt nicht, unterhalb kann sie aber bei alternativer (und teilparalleler) Betriebsweise auf null absinken. Im Falle eines Heizstabs ändert sich die angeschlossene Nennleistung jedoch – und dies mitunter deutlich. Typischerweise sind in Wärmepumpensystemen 3-stufige Heizstäbe verbaut, die dann jeweils ca. 3 kW Anschlussleistung haben.

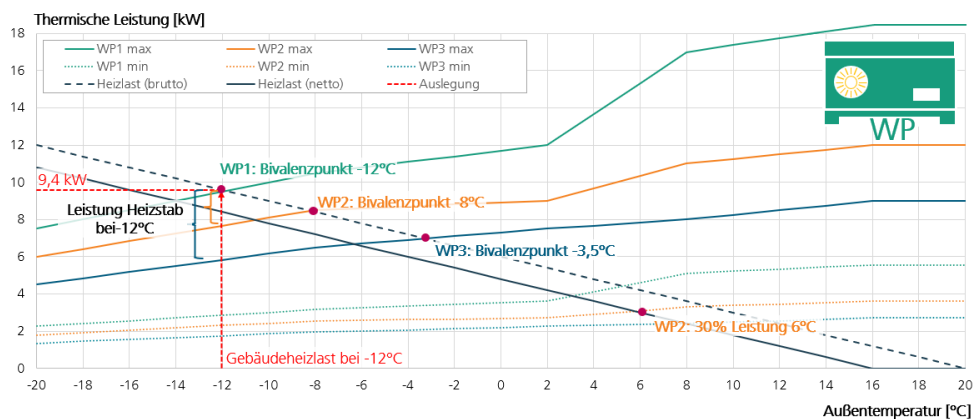


Abbildung 8: Beispielhafter Zusammenhang von Heizleistung einer Wärmepumpe und Gebäudeheizlast im Hinblick auf die Festlegung eines Bivalenzpunktes und der damit benötigten Heizleistung eines Heizstabs.

In Abbildung 9 ist die typische Verortung der Heizstäbe in Wärmepumpensystemen aus dem Fraunhofer-Projekt WPQS dargestellt. Auf dem Markt existieren viele Wärmepumpen-Serien, bei denen ein Heizstab innerhalb des Wärmepumpengerätes bzw. eines Hydraulikmodules im Vorlauf der Wärmepumpe installiert ist (siehe linke Darstellung in Abbildung 9). Gleichzeitig gibt es auch Wärmepumpen-Serien, die keinen Heizstab im Vorlauf verbaut haben. Oftmals bieten die Hersteller unterschiedliche Hydraulikmodule

(teils auch Inneneinheiten genannt), die eine unterschiedliche Ausstattung aufweisen. Eine andere – ebenfalls verbreitete – Variante ist, dass ein Heizstab im Trinkwasserspeicher und/oder Heizpufferspeicher eingebaut ist.

 Allgemeine Zusammenhänge zur
 Gleichzeitigkeit von
 Wärmepumpen

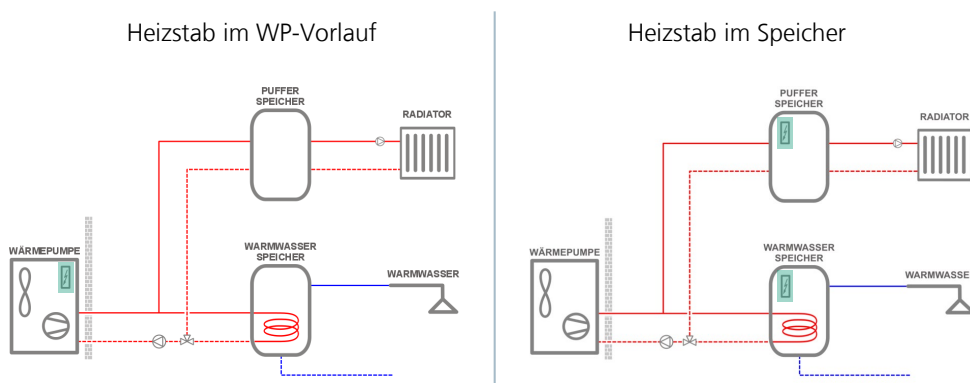


Abbildung 9: Verortung von Heizstäben in Wärmepumpensystemen.

Die elektrische Anschlussleistung der Heizstäbe übersteigt oftmals die der eigentlichen Wärmepumpe. Je nach Anlagendesign werden dabei jedoch nicht alle Heizstufen aktiv genutzt. Darüber hinaus sollen Heizstäbe in vielen Systemen primär als Notheizung im Falle eines Wärmepumpenausfalls dienen; in anderen Anlagen werden sie vor allem für die Trinkwarmwasserbereitung oder während der Legionellenschaltung eingesetzt. Diese Unsicherheiten erschweren die Ableitung belastbarer Aussagen zu Gleichzeitigkeiten und Tageslastprofilen erheblich. Eine Auswertung von 20 Wärmepumpenanlagen aus dem Projekt WPQS hat beispielsweise gezeigt, dass bei einer durchschnittlich gemessenen elektrischen Wärmepumpenleistung von 4,6 kW zusätzlich installierte Heizstabelleistungen von im Mittel 6,5 kW vorhanden sind. Basierend auf dieser Analyse wurde in dieser Studie 3,2 als Startwert (reflektiert eine Anlage) für die Gleichzeitigkeitsfunktion von LW-Wärmepumpen inkl. Heizstab festgelegt, wie in Tabelle 1 aufgeführt. Da die maximal gemessenen Wärmepumpenleistungen ohne Heizstab ca. 30 % oberhalb der Leistungen im Prüfpunkt A-7/W55 liegen, wurde ein Startwert für die Gleichzeitigkeitsfunktion ohne Heizstab von 1,3 definiert.

Leistungs- und Effizienzwerte	
Mittlere elektrische Leistungen im Prüfpunkt A-7/W55: $P_{\text{Prüf}}$	3,5 kW
Mittelwert der gemessenen maximalen Leistung: P_{Mess}	4,6 kW
Mittelwert der maximalen Leistung der Heizstäbe: P_{HS}	6,5 kW
Wert der Gleichzeitigkeitsfunktion für eine Anlage bezogen auf A-7/W55	
Ohne Heizstab ($P_{\text{Mess}}/P_{\text{Prüf}}$)	1,3
Mit Berücksichtigung des Heizstabs ($(P_{\text{Mess}}+P_{\text{HS}})/P_{\text{Prüf}}$)	3,2

Tabelle 1: Basiswerte für die Gleichzeitigkeitsfunktion von Luft-Wasser-Wärmepumpen

3.2.4 Anwendbarkeit der Gleichzeitigkeitsfunktionen

Gleichzeitigkeitsfunktionen beschreiben den Zusammenhang zwischen der Anzahl von Verbrauchern und der dabei auftretenden zeitgleichen Maximalleistung. Damit können Netzbetreiber die Netzlast von Wärmepumpen für den Auslegungsfall abschätzen. Gleichzeitigkeitsfunktionen beziehen sich stets auf eine definierte Nennleistung der jeweiligen Verbraucher, wobei ein einzelner Funktionswert als Gleichzeitigkeitsfaktor bezeichnet wird. Beispielhafte Gleichzeitigkeitsfunktionen sind in Abbildung 10

dargestellt. Darin ist der Gleichzeitigkeitsfaktor für Luft-Wasser-Wärmepumpen bei 15 Anlagen sowie für Wasser-Wasser-Wärmepumpen bei 20 Anlagen gekennzeichnet.

 Allgemeine Zusammenhänge zur
 Gleichzeitigkeit von
 Wärmepumpen

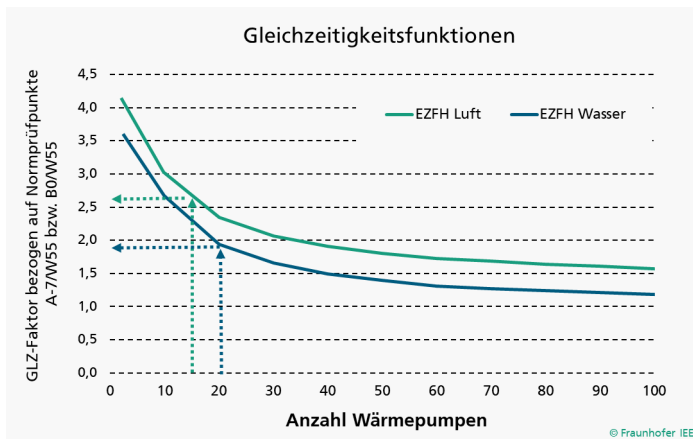


Abbildung 10: Beispielhafte Gleichzeitigkeitsfunktionen für LW- und WW-Wärmepumpen.

Die Anwendung von Gleichzeitigkeitsfunktionen für Wärmepumpen bzw. die Bestimmung der resultierenden Netzlast erfolgt je nach verfügbarer Ausgangsdatenlage unterschiedlich:

1. Fall: Sind die elektrischen Leistungen der Wärmepumpen an den Prüfpunkten A-7/W55 bzw. B0/W55 für betreffende Anlagen bekannt, kann die Summe dieser elektrischen Leistungen direkt mit dem für die jeweilige Anlagenanzahl zutreffenden Gleichzeitigkeitsfaktor multipliziert werden, um die resultierende Netzlast zu bestimmen.
2. Fall: Ist lediglich die Heizlast der Gebäude bekannt, muss zunächst die thermische Leistung bezogen auf die Prüfpunkte A-7/W55 bzw. B0/W55 abgeschätzt werden (z. B. 80 % der Heizlast bei Norm-Auslegungstemperaturen von ca. -12 °C). Anschließend lässt sich aus dem durchschnittlichen COP aller Anlagen in den Prüfpunkten (z. B. 2,45 für Luft-Wasser-Wärmepumpen und 3,8 für Wasser-Wasser-Wärmepumpen) die entsprechende elektrische Gesamtleistung berechnen. Analog zum ersten Fall ist dann die elektrische Leistung mit dem für die jeweilige Anlagenanzahl zutreffenden Gleichzeitigkeitsfaktor zu multiplizieren, um die Netzlast zu erhalten.

Zur messdatenbasierten Bestimmung von Tageslastgängen und Gleichzeitigkeitsfunktionen wurden in dieser Studie zwei unterschiedliche Datensätze verwendet. Zum einen wurde 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 nutzte das Fraunhofer ISE einen Messdatensatz aus dem Forschungsprojekt »WPQS im Bestand«. Hierbei handelt es sich um insgesamt 66 Wärmepumpenanlagen, davon 52 LW-WP und 14 SW-WP. Eine Zusammenfassung der Datensätze zeigt Tabelle 2.

Betriebsdaten der Fa. Stiebel-Eltron	Messdaten aus dem Projekt WPQS
<ul style="list-style-type: none"> • Ca. 26.000 Anlagen, weltweit, davon ~ 12.000 in DE, 5.600 in Schweiz, 1.100 in Österreich • 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 (NH), etc. 	<ul style="list-style-type: none"> • 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, Speicherpumpe(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

Tabelle 2: Charakteristik der Datensätze

Beiden Datensätzen gemeinsam ist, dass keine bzw. nur rudimentäre Informationen über die versorgten Gebäude vorliegen, wodurch keine Bewertung des Betriebsverhaltens in Bezug auf die Normheizlast möglich war.

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. Beim Anlagentyp LWZ, einem Kompaktgerät aus Lüftungsanlage und innen aufgestellter Luft-Wasser-Wärmepumpe zum Heizen, Kühlen und zur TWW-Bereitung werden ca. 350 Messpunkte übermittelt. Mit ca. 3.300 Anlagen stellen die LWZ-Geräte ein großes

Marktsegment der Fa. Stiebel-Eltron dar. Aufgrund der Integration eines zentralen Lüftungsgeräts dürften fast alle diese Anlagen aber im Neubau zum Einsatz kommen, so dass LWZ-Geräte in dieser Studie nicht weiter betrachtet wurden. Hinsichtlich der klassischen Luft-Wasser-Wärmepumpen stellen die Geräte mit der Bezeichnung WPM-Systems mit ca. 6.600 Geräten die größte Gruppe dar. WPM-Systems-Geräte, zu denen sowohl die Geräte der Fa. Stiebel-Eltron als auch die von der Fa. Tecalor zählen, übermitteln ca. 80 Datenpunkte, auf Basis derer das Betriebsverhalten gut analysiert werden kann. Ältere Geräte sowie Sole-Wasser- und Wasser-Wasser-Wärmepumpen mit der internen Bezeichnung WPM_X haben mit 20-40 Datenpunkten einen deutlich reduzierten Datensatz, der im Wesentlichen Schaltsignale und nur wenige Messgrößen beinhaltet.

Bei der Sichtung des Datenpools wurde zudem ersichtlich, dass nicht bei allen Geräten die 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 genau Typzuordnung oder die regionale Verortung der Anlagen möglich. Unvollständige Daten oder fehlenden Anlageninformationen führten dazu, dass je nach Fragestellung ein unterschiedlicher Anlagenpool innerhalb der Studie verwendet werden musste.

Die Verteilung der Anlagen in Deutschland zeigt Abbildung 11, einmal für alle Wärmepumpen und einmal beschränkt auf die WPM-Systems-Geräte.

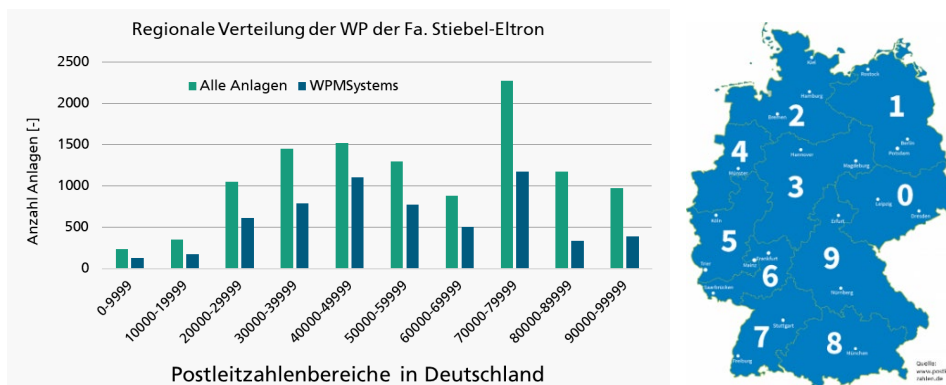


Abbildung 11: Regionale Verteilung der Anlagen der Fa. Stiebel-Eltron getrennt nach Postleitzahlbereichen.

Die sich aus der geographischen Verteilung ergebende Verteilung der ortsbezogenen Auslegungstemperaturen zeigt Abbildung 12. Zu erkennen ist, dass im deutschlandweiten Anlagenpool nur verhältnismäßig wenige Anlagen Auslegungstemperaturen von unter -12°C haben.

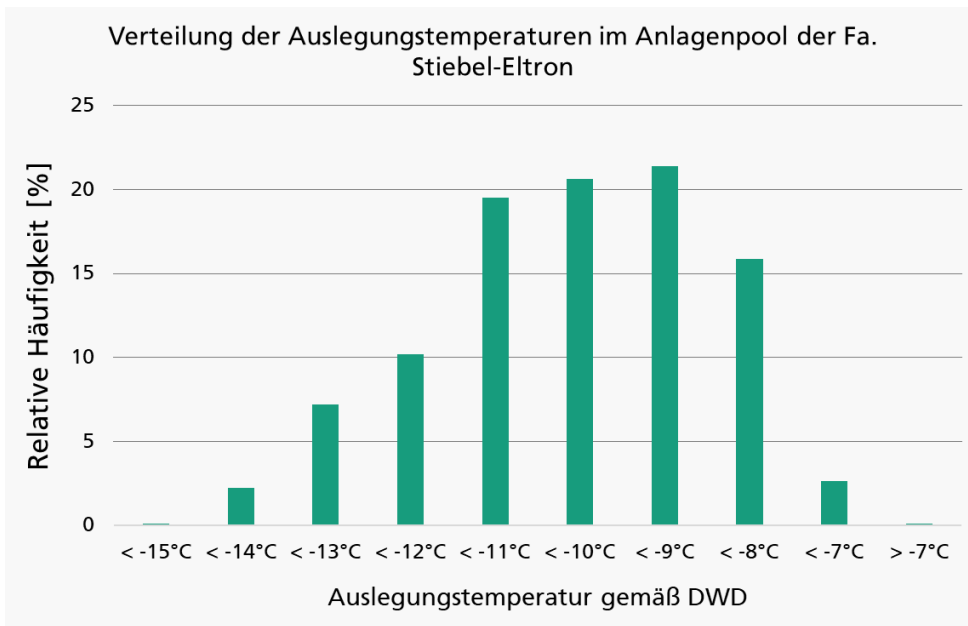


Abbildung 12: Häufigkeitsverteilung der standortbezogenen Auslegungstemperaturen der Anlagen aus dem Datenpool der Fa. Stiebel-Eltron.

Im Großraum München waren zum Betrachtungszeitpunkt 22 Wärmepumpen der Fa. Stiebel-Eltron mit Kommunikationsmodul installiert. Die Verteilung der Anlagen über das Stadtgebiet mit Bezug zum Wärmeplan der Stadt München zeigt Abbildung 13.

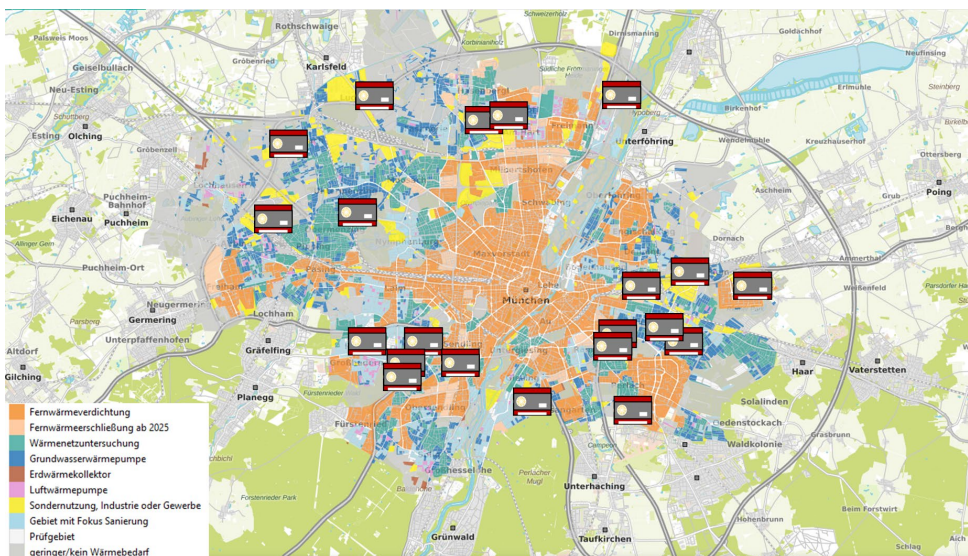


Abbildung 13: Verteilung der WP-Anlagen der Fa. Stiebel-Eltron im Stadtgebiet München (Hintergrundgrafik aus der kommunalen Wärmeplanung der Stadt München).

Neben der Datenmenge ist für die messdatenbasierte Entwicklung von Gleichzeitigkeitsfunktionen die Verfügbarkeit von Messdaten bei niedrigen Außentemperaturen wichtig. Diesbezüglich zeigt Abbildung 14 die kumulierte Häufigkeitsverteilung der Außentemperaturen in München im Vergleich zu den Feldmessungen aus dem Projekt WPQS. Die Datenbasis für den Vergleich ist:

- Wetterdaten München: DWD von 2003 bis 2022 (7.305 Tage)
- Außentemperatur Feldmessung: 66 Anlagen aus dem Projekt WPQS im Bestand vom 1.1.2021 bis zum 31.7.2024 (62.268 Tage)

Zum einen zeigt sich, dass in München im Vergleich zu einer deutschlandweiten Verteilung sowohl im Mittel als auch insbesondere hinsichtlich der Extremwerte niedrigere Außentemperaturen auftreten. Darüber hinaus ist erkennbar, dass aufgrund der deutschlandweit verteilten Anlagen sowie der in den letzten Jahren vergleichsweise milden, klimawandelbedingt wärmeren Winter nur sehr wenige Tage mit Tagesmitteltemperaturen unter -12 °C auftreten – also jener Auslegungstemperatur, die für München maßgeblich ist.

Aus diesem Grund wurde im Rahmen der Studie entschieden, nicht nur für die Untersuchungen zu Flexibilitätseffekten, sondern auch bei der Erstellung der Tageslastprofile und Gleichzeitigkeitsfunktionen ergänzend zu den messdatenbasierten Auswertungen auf numerische Simulationen zurückzugreifen.

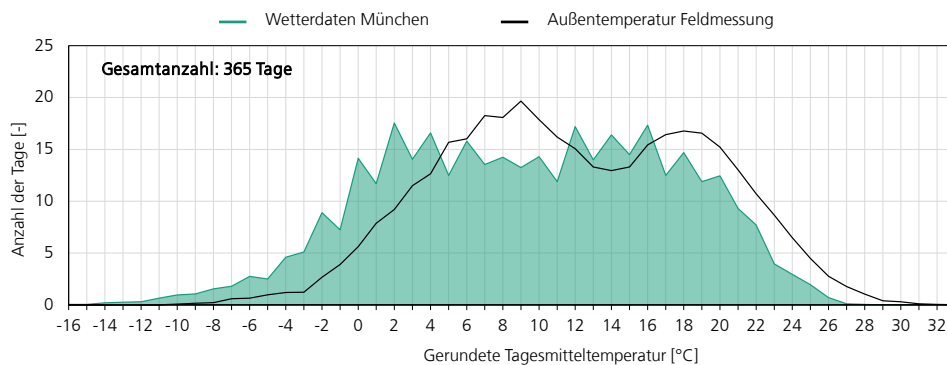


Abbildung 14: Kumulierte Häufigkeitsverteilung der Tagesmittel-Außentemperatur normiert auf 365 Tage.

5 Betriebsverhalten von Wärmepumpen

5.1.1 Betrachtung von Einzelanlagen

Zur Entwicklung einer Charakteristik für Wärmepumpenkollektive ist ein detailliertes Verständnis der Betriebsweise einzelner Wärmepumpensysteme notwendig. Dazu gehört sowohl die Identifikation gemeinsamer Muster als auch die Analyse der Variationsbreite unterschiedlicher Betriebsverhalten. In Abbildung 15 sind beispielhaft für ausgewählte Anlagen aus dem Datenpool die Wärmeleistungen in Abhängigkeit der Außentemperatur auf Basis von 15-Minuten-Mittelwerten dargestellt. Zu erkennen ist ein ausgeprägtes Wärmeleistungsprofil mit einem Abfallen der Wärmeleistung bei niedrigen Außentemperaturen sowie einem Teillastbetrieb bei höheren Außentemperaturen. Die Punkte, ab denen die Leistungen jeweils abfallen, sowie die Modulationsbreite weisen bei allen betrachteten Wärmepumpen aus dem Datenpool Unterschiede auf.

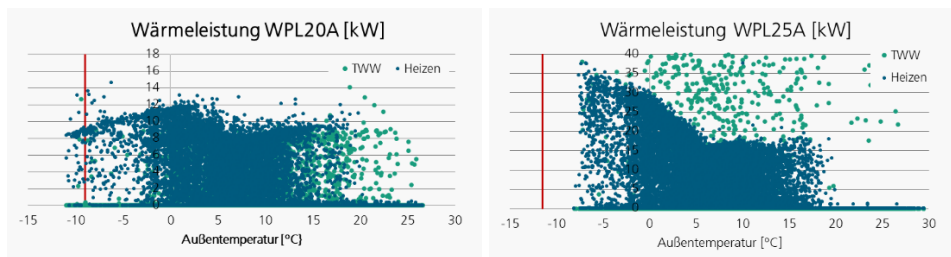


Abbildung 15: 15-Minuten-Mittelwerte der thermischen Leistung von zwei Stiebel-Eltron Wärmepumpen: (links) WPL20 A, Mildstedt, T-Auslegung: $-9,0^{\circ}\text{C}$, (rechts) WPL25 A, Dexbach, T-Auslegung: $-11,5^{\circ}\text{C}$

Die Unterschiede zwischen einzelnen Anlagen zeigen sich auch bei der Analyse der Verdichterdrehzahl, der Zuschaltung von Heizstäben sowie dem Taktverhalten, wie in Abbildung 16 dargestellt ist. Zu erkennen sind verschiedene maximale Drehzahlen je nach Wärmepumpentyp und damit auch ein unterschiedlicher Modulationsbereich, der sich im differierenden Taktverhalten der Wärmepumpen widerspiegelt. Hinsichtlich des Heizstabbetriebs lassen sich ebenfalls sehr unterschiedliche Betriebsweisen beobachten. Die rechte der beiden dargestellten Anlagen weist einen Heizstabbetrieb über den gesamten Außentemperaturbereich auf, während die linke Anlage nur vereinzelt bei Temperaturen in der Nähe des Auslegungspunkts Heizstäbe zuschaltet.

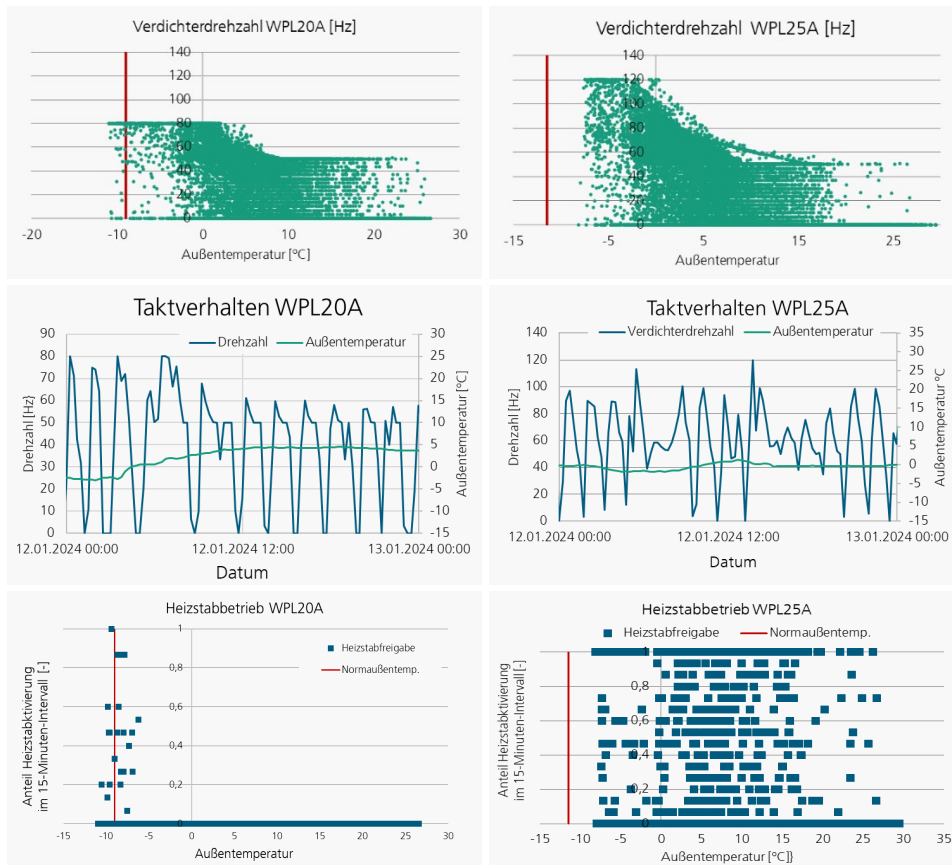


Abbildung 16: Exemplarische Darstellung des Betriebsverhaltens von zwei Wärmepumpen der Fa. Stiebel-Eltron. (Oben) Verdichterdrehzahl in Abhängigkeit der Außentemperatur, (Mitte) Verdichterdrehzahl für zwei Tage im Februar 2024, (Unten) Zuschaltung des Heizstabs in Abhängigkeit der Außentemperatur.

Der Einfluss der Wärmepumpenauslegung auf das Betriebsverhalten der 10 am meisten vorkommenden Luft-Wasser-Wärmepumpentypen (insgesamt ca. 4500 WP) ist in Abbildung 17 für drei Auslegungsvarianten (passend, über- und unterdimensioniert) dargestellt. Die Untersuchungen zeigen, dass unterdimensionierte Anlagen bei sinkenden Außentemperaturen deutlich höhere relative Verdichterdrehzahlen und Leistungsaufnahmen aufweisen, während überdimensionierte Geräte mit niedrigeren relativen Leistungen betrieben werden.

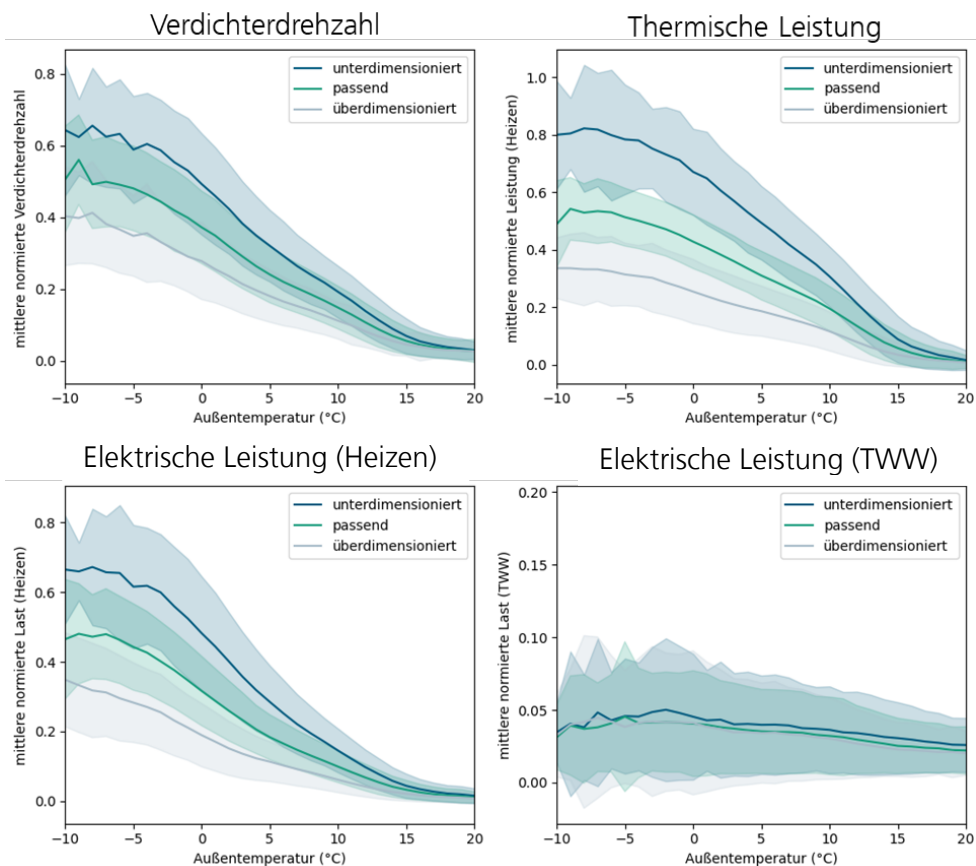


Abbildung 17: Darstellung des Betriebsverhalten in Abhängigkeit der Außentemperatur von unterschiedlich groß auf den Wärmebedarf der Gebäude abgestimmten Wärmepumpen (bezogen auf A-7/W55).

Bei der Betrachtung der mittleren täglichen Wärmeleistung – also des Wärmebedarfs des Gebäudes – für identische Wärmepumpentypen zeigt Abbildung 18, dass sowohl die Höhe der mittleren Leistung (z. B. bei 0 °C) als auch der Verlauf der Kurve unterhalb von 0 °C unterschiedlich ausfallen. Die Höhe der mittleren Leistung spiegelt die unterschiedlichen Wärmebedarfe der Gebäude und damit die jeweilige passgenaue Dimensionierung wider; der Verlauf der Kurve unterhalb von 0 °C kann dagegen zwei Ursachen haben:

- Bei niedrigen Temperaturen ändert sich das Nutzverhalten, z.B. durch 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.

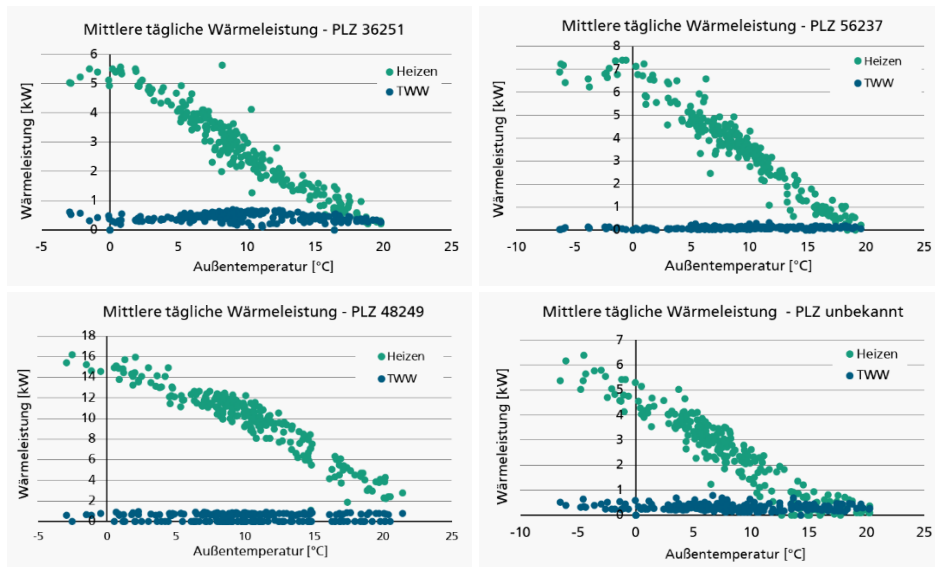


Abbildung 18: Beispielhafte Darstellung der mittleren täglichen Wärmeleistung für vier WP-Anlagen des Typs WPL-A 07 HK 230 Premium.

Die gleichen Aspekte sind beim Vergleich der mittleren täglichen Wärme- und Stromleistungen in Abbildung 19 zu erkennen. Ein Abflachen der Wärmebedarfskurve bei kalten Temperaturen führt auch bei den Stromleistungen zu einem Abflachen der Leistungskurve. Zusätzlich ist erkennbar, dass durch den sinkenden COP die Steigung der Stromleistungskurve mit sinkenden Temperaturen zunimmt.

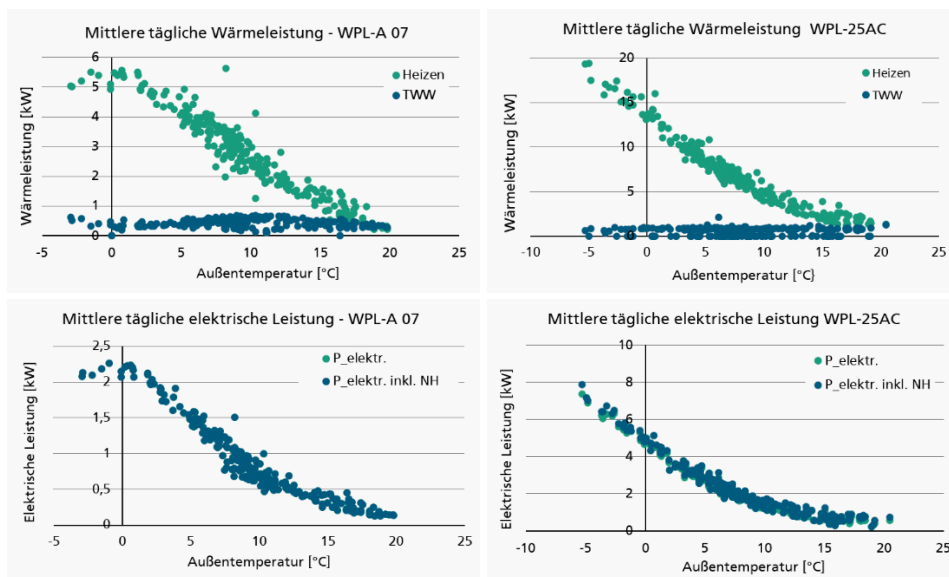
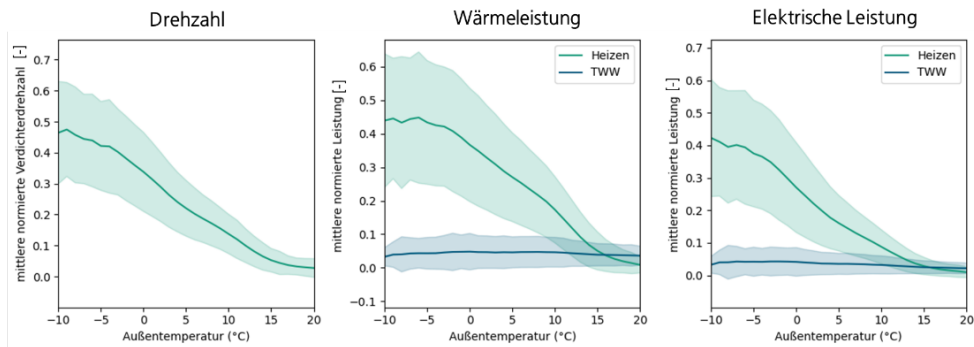


Abbildung 19: Beispielhafte Darstellung der mittleren Wärmeleistung und mittleren elektrischen Leistung. (links) WPL-A 07 HK 230 Premium, Bad Hersfeld, (rechts) WPL 25A, Dexbach.

Die Betrachtung des vollständigen Pools der WPM-Systems-Anlagen in Deutschland zeigt Abbildung 20.



Betriebsverhalten von Wärmepumpen

Abbildung 20: Mittleres Betriebsverhalten der WPM-Systems-Anlagen (bezogen auf A-7/W55) in Abhängigkeit der Tagesmitteltemperatur.

Hinsichtlich Sole-Wasser sowie Wasser-Wasser-Wärmepumpen ist die Datenpunkt-Menge deutlich eingeschränkt; elektrische Leistungen oder Drehzahlen sind beispielsweise nicht vorhanden. Insbesondere ist keine Information über den genauen Typ der Wärmepumpe verfügbar, so dass keine Darstellung der normierten Leistung bezogen auf die entsprechenden Prüfpunkte möglich ist. Das Verhalten der mittleren Wärmeleistung aufgetragen gegenüber der Außentemperatur zeigt Abbildung 21. Zu erkennen ist ein ähnliches Verhalten der Wärmeleistung, wie es auch bei Luft-Wasser-Wärmepumpen zu beobachten ist. Bei niedrigen Außentemperaturen laufen die Leistungskurven in eine Sättigung hinein, was aufgrund der geringeren Abhängigkeit der Wärmeleistung der Wärmepumpe von der Außentemperatur auf ein verändertes Heiz- und Lüftungsverhalten hindeutet.

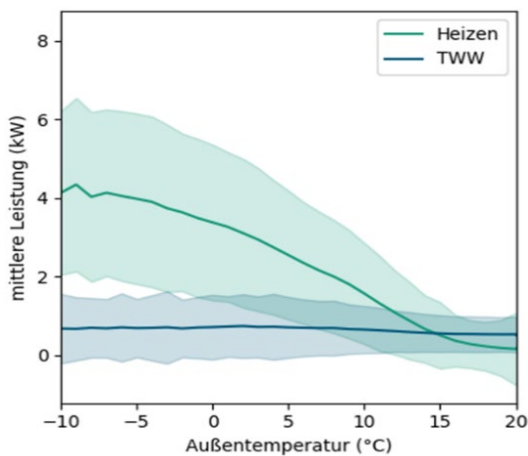


Abbildung 21: Mittlere Wärmeleistung (mit Bandbreite) der Sole- bzw. Wasser-Wasser-Wärmepumpenanlagen der Fa. Stiebel-Eltron.

Abbildung 22 zeigt die normierte tagesmittlere elektrische Leistung von fünf ausgewählten, beispielhaften LW-WP, basierend auf den Messdaten der Feldmessung im Rahmen des Projekts WPQS. Alle fünf Anlagen sind modulierend, monoenergetisch mit elektrischen Heizstäben ausgestattet und dienen der Bereitstellung von Raumwärme sowie Brauchwarmwasser. Die normierte tagesmittlere elektrische Leistung wird aus dem gesamten Stromverbrauch über einen Zeitraum von 24 Stunden berechnet. Wie erwartet, steigt die tagesmittlere elektrische Leistung mit sinkender Außenlufttemperatur. Allerdings erreicht nur eine der fünf Anlagen (ALWP_02) – ohne Berücksichtigung der Heizstabelleistung – den Referenzwert bei A-7/W55. Wird die Heizstabelleistung berücksichtigt, überschreitet der Tagesmittelwert von ALWP_02 den Referenzwert deutlich.

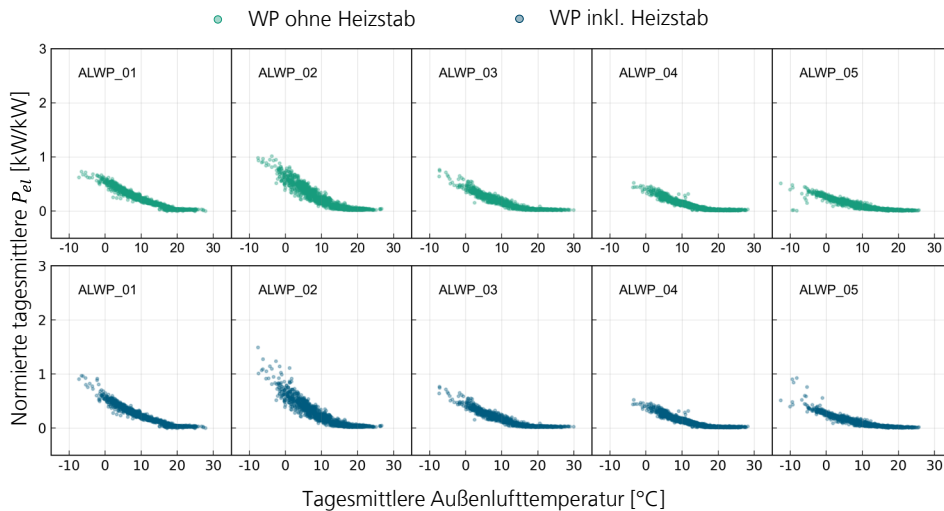


Abbildung 22: Normierte tagesmittlere elektrische Leistung (P_{el}) von fünf Luft-Wasser-Wärmepumpen ohne Heizstableistung (grüne Punkte) und mit Heizstableistung (blaue Punkte).

Die normierte tagesmaximale elektrische Leistung der fünf LW-WP – sowohl mit als auch ohne Heizstableistung – ist in Abbildung 23 dargestellt. Diese Werte sind auf Grundlage der 15-minütigen durchschnittlichen elektrischen Leistung berechnet. Es zeigt sich eine deutliche Korrelation zwischen der tagesmaximalen Leistungsaufnahme und der durchschnittlichen Außenlufttemperatur. Bei allen fünf Anlagen überschreitet die maximale elektrische Leistungsaufnahme ohne Berücksichtigung der Heizstableistung an kalten Tagen den Referenzwert bei A-7/W55. Die Nutzung der Heizstäbe variiert zwischen den Anlagen. Allgemein führt die Heizstabnutzung zu kurzfristigen Leistungsspeaks. Bei ALWP_01, ALWP_02 und ALWP_05 ist ein signifikanter Heizstabbetrieb bei niedrigen Außenlufttemperaturen zu beobachten, der als zusätzliche Wärmeerzeugung dient. Darüber hinaus wird der Heizstab bei ALWP_01 und ALWP_03 an warmen Tagen mit geringer Wärmepumpenleistung aufgrund von Wärmepumpenausfällen eingesetzt. Bei ALWP_04 ist kein signifikanter Heizstabbetrieb zu beobachten.

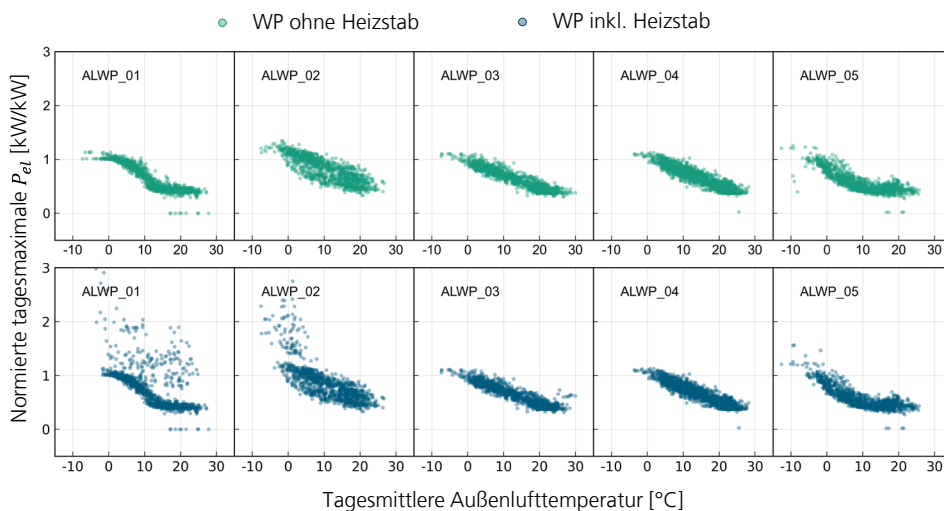


Abbildung 23: Normierte tagesmaximale elektrische Leistung (P_{el}) von fünf Luft-Wasser-Wärmepumpen ohne Heizstableistung (grüne Punkte) und mit Heizstableistung (blaue Punkte).

5.1.2 Clusterung des Anlagenpools

Wie die zuvor dargelegte Betrachtung von Einzelanlagen zeigt, können diese ein völlig unterschiedliches Betriebsverhalten aufweisen. Um dies bei der Entwicklung der Tageslastprofile und Gleichzeitigkeitsfunktionen zu berücksichtigen, erfolgte eine Clusterung des Anlagenpools der Stiebel-Eltron-Anlagen hinsichtlich verschiedener Merkmale. Aufgrund der Unkenntnis über die jeweiligen Gebäude und damit deren Baualter, Nutzfläche oder Bewohnerzahl wurde die Clusterung rein auf Basis der Betriebsdaten durchgeführt. Die Grundvarianz der WPM-Systems-Anlagen in Deutschland mit ihren jeweiligen Heizleistungen bei A-7/W55 zeigt Tabelle 3. Im Mittel über alle Stiebel-Eltron-WPM-Systems-Anlantypen wurde ein COP von 2,45 im Prüfpunkt A-7/W55 identifiziert. Dieser Wert kann für pauschale Umrechnungen von Heizleistung in elektrische Leistung (exkl. Heizstäbe) herangezogen werden.

WP-Typ	Anzahl der Anlagen	Heizleistung in kW bei A-7/W55
WPL-A 07 HK 230 Premium	1236	7,0
WPL 25 A	1033	13,9
WPL 20 A	747	10,7
WPL 25 AC	581	13,9
WPL 24	297	15,5
TTL 25 A	241	13,3
WPL-A 05 HK 230 Premium	235	4,9
TTL 7.6 ACS	229	4,9
WPL 19	196	10,6
WPL 20 AC	183	10,7
Summe der Anlagen	4978	

Tabelle 3: Grundvarianz der WPM-Systems-Anlagen von Stiebel-Eltron in Deutschland

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 24 zeigt grafisch Höhen und Steigungen der jeweiligen Heizkurven.

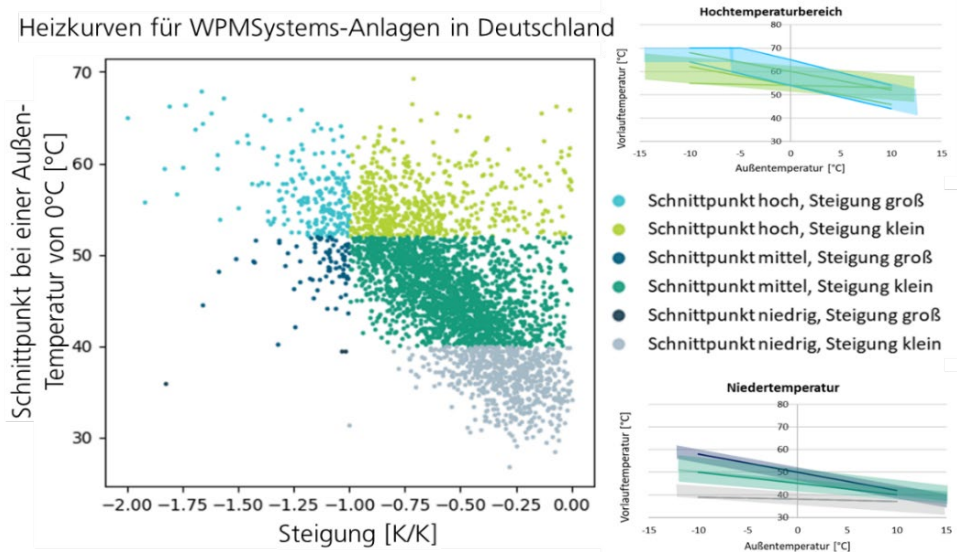


Abbildung 24: Verteilung der Heizkurven im Anlagenpool.

Zu erkennen ist, dass im Pool der WPM-Systems-Anlagen sowohl Anlagen mit Vorlauf-temperaturen bis 70 °C, die auf Gebäude mit relativ schlechtem energetischem Zustand schließen lassen, als auch Anlagen mit sehr niedrigen Vorlauftemperaturen, die typischerweise auf Fußbodenheizungen und damit auf Neubauten hindeuten, vorkommen. Etwa die Hälfte der Anlagen lässt sich einem mittleren Niveau mit flacher Steigung zuordnen – also Heizkörpersystemen im (teil-)sanierten Gebäudebestand.

Neben der Heizungs-Vorlauf-temperatur beeinflusst die Trinkwarmwasser-Vorlauf-temperatur die Effizienz eines Wärmepumpensystems und den Heizstabbetrieb. In Abbildung 25 ist die Verteilung der Vorlauf-temperaturen zur Trinkwarmwasserbereitung dargestellt. Es zeigt sich, dass die Hälfte der Anlagen Vorlauf-temperaturen zwischen 53°C und 59°C haben, aber insgesamt eine Bandbreite von ca. 42°C (Frischwasserstationen) bis ca. 70°C (TWW-Speicher) vorkommt.

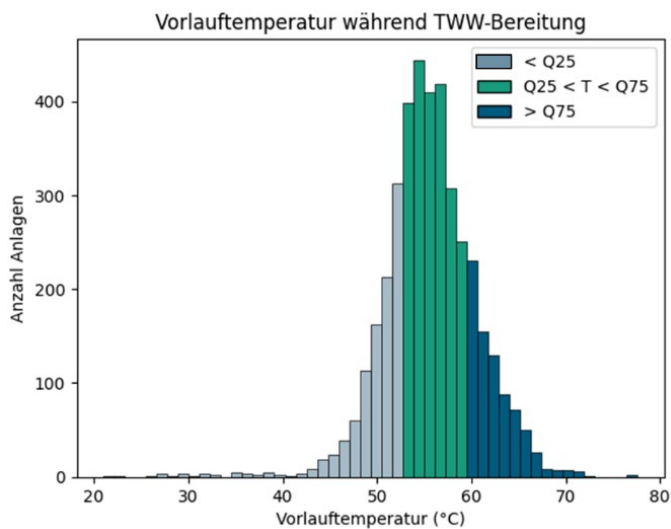


Abbildung 25: Verteilung der Vorlauf-temperaturen zur TWW-Bereitung.

Einen wesentlichen Einfluss auf das Betriebsverhalten – insbesondere bei niedrigen Außentemperaturen – hat die Wahl des Bivalenzpunktes. Wegen der sehr eingeschränkten Verfügbarkeit an Messdaten mit kalten Tagen in den beiden verwendeten Datensätzen (u. a. aufgrund der warmen Winter der letzten Jahre) wurde die Dimensionierung anhand von Tagen mit einer mittleren Außentemperatur von -7 °C identifiziert. Da weder der eigentliche Bivalenzpunkt noch die Heizlast des Gebäudes auf Basis einer Heizlastberechnung (DIN EN 12831) vorlagen, wurde analysiert, wie hoch die mittleren Leistungen der Wärmepumpen bei einer Tagesmitteltemperatur von -7 °C normiert auf ihre Nennleistungen im Prüfpunkt A-7/W55 ausfallen. In Abbildung 26 ist die Häufigkeitsverteilung der normierten Leistungen dargestellt. »Passende« Anlagen werden hier so definiert, dass die normierte Leistung zwischen 0,5 und 0,8 liegt, da bei der mittleren Leistung eines Tages folgende Aspekte berücksichtigt werden müssen:

- Tagesgang: ca. 50 % höhere Leistung wird in der Morgenspitze abgerufen
- 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 bedeutet, dass die Wärmepumpe auch an kalten Tagen und auch in den Morgenspitzen monovalent die notwendige Leistung bereitstellen kann. Mögliche Gründe für die Überdimensionierung sind:

Betriebsverhalten von
Wärmepumpen

- Die Heizlastberechnung als statisches Verfahren berücksichtigt das Nutzerverhalten insbesondere an kalten Tagen nur ungenügend.
- 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 Anlagen durch Wärmepumpen wird die Leistung des alten Wärmeerzeugers oft als Richtwert herangezogen.

Die Auswertung hat zudem ergeben, dass die Verteilung der normierten Leistungen nur eine geringe Abhängigkeit von der Auslegungstemperatur hat. Wärmepumpen werden in Deutschland relativ ähnlich ausgelegt und nicht exakt nach Auslegungstemperatur. 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.

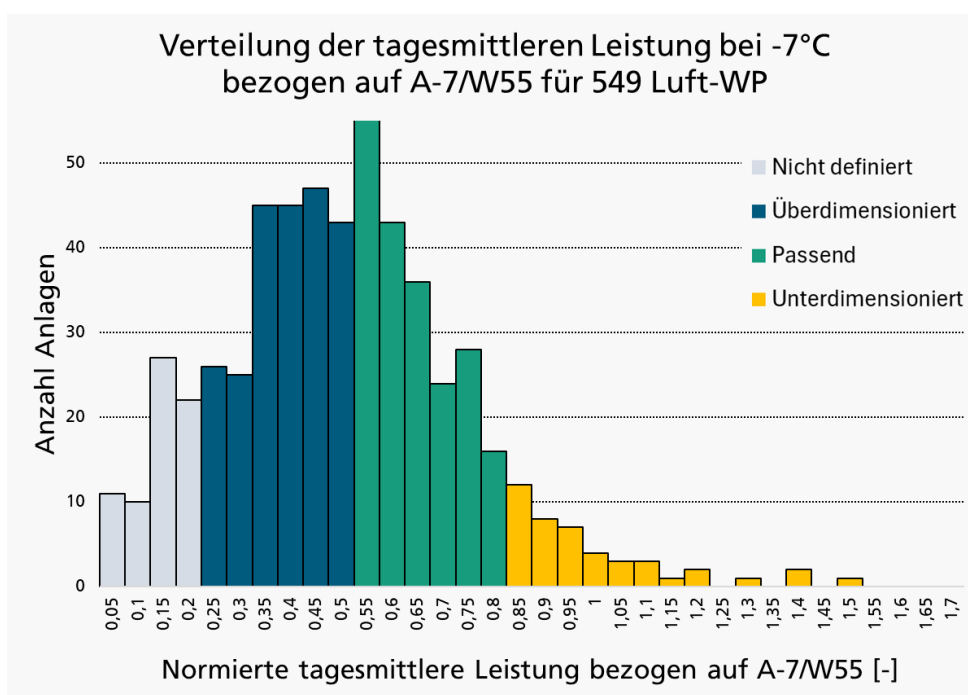


Abbildung 26: Verteilung der normierten Tagesmittelleistung bezogen auf den Betriebspunkt A-7/W55 bei LW-WP. »Unterdimensionierte« Anlagen würden diesbezüglich hohe Bivalenzpunkte (-5°C bis 0°C) haben, »passende« Anlagen können Bivalenzpunkte von -5°C bis -10° (und damit teilweise auch monovalent) zugeordnet 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 27. Erkennbar ist, dass bei Anlagen mit Auslegungstemperaturen des Standorts unter -12°C der Anteil der bezogen auf eine Tagesmitteltemperatur von -7°C überdimensionierten Anlagen größer ist als bei den höheren Auslegungstemperaturen, d.h. bei niedrigeren Auslegungstemperaturen tendenziell niedrigere Bivalenzpunkte seitens der Installateure gewählt werden. Allerdings sind

die Unterschiede in den Verteilungen sehr gering, so dass im Anlagenpool mit ähnliche Betriebsverhalten der Wärmepumpen bei jeweils gleichen Außentemperaturen ausgegangen werden kann.

Betriebsverhalten von
Wärmepumpen

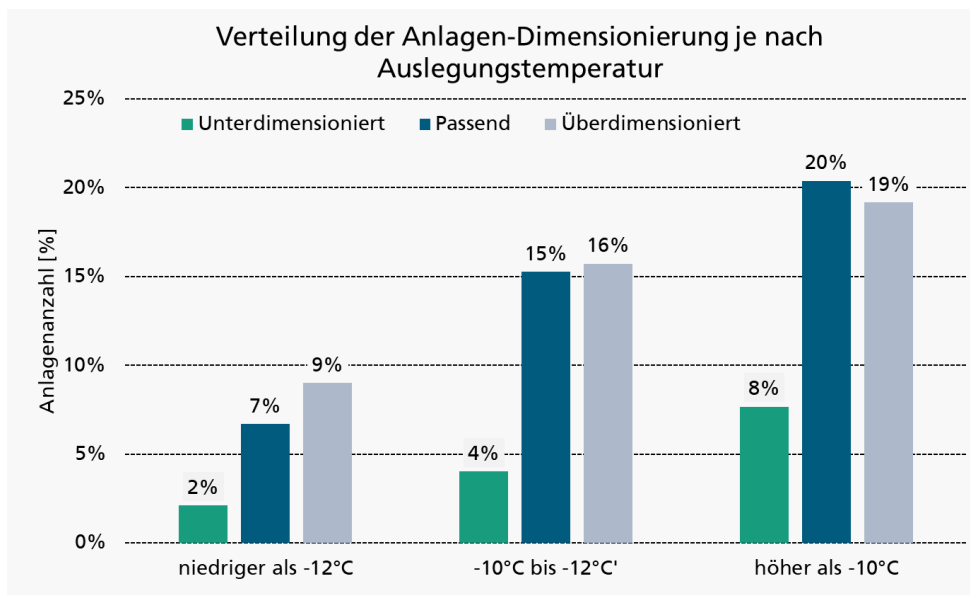


Abbildung 27: Verteilung der Dimensionierung in Abhängigkeit von der Auslegungstemperatur.

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 0,5 (siehe Abbildung 28). Somit zeigen die im Mittel von Installateuren gewählten und sich dann im Betrieb einstellenden Bivalenzpunkte keine Korrelation zur Gebäudeeffizienz.

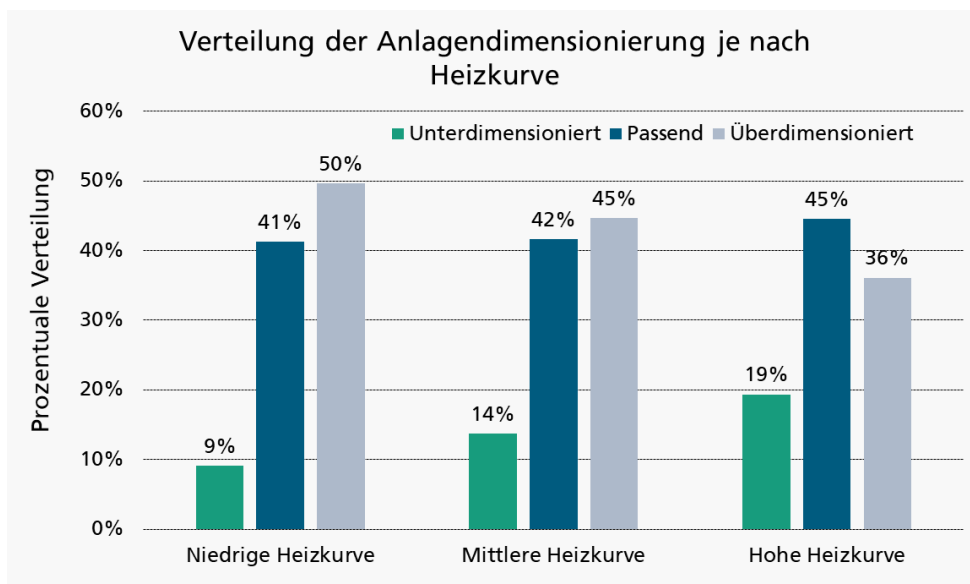


Abbildung 28: Verteilung der Dimensionierung in Abhängigkeit von der Heizkurve.

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. Bestrebungen, hier auf Installateure einzuwirken, gibt es.

Zusammenfassend lassen die Analysen des Betriebsverhaltens folgende Schlussfolgerungen zu:

Betriebsverhalten von
Wärmepumpen

- Neben der Außentemperatur sind die wichtigsten Einflussgrößen auf das Betriebsverhalten:
 - Dimensionierung / effektiver Bivalenzpunkt (Passend, Über- oder Unterdimensioniert)
 - Wärmepumpentyp (Wasser- oder Luft-Wasser-WP)
 - Gebäudealter & Sanierungszustand (Vollsaniert/Neubau oder Teilsaniert)
 - Gebäudetyp (Gewerbe, MFH oder EZFH).
- Der Heizstabbetrieb ist i.d.R. nur an sehr kalten Tagen erkennbar – selbst für unterdimensionierte Anlagen (an kalten Tagen nur 20 % der maximalen täglichen Laufzeit).
- Trinkwarmwassertemperaturen sind sehr unterschiedlich, haben aber kaum Korrelation zum Heizstabbetrieb.
- Es bestehen geringe Unterschiede zwischen Wochentag und Wochenende bei Wohnnutzung.
- EVU-Abschaltungen sind bei einzelnen Anlagen erkennbar; im Gesamt-Pool aber nicht relevant.

6 Simulationsmodelle

6.1.1

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 Tageslastgängen und Gleichzeitigkeitsfunktionen:

- Es gibt nur eine eingeschränkte Datenverfügbarkeit – speziell für sehr niedrige Außentemperaturen und bestimmte Wärmepumpen- und Gebäudetypen.
- Durch das Clustern des Anlagenpools nach bestimmten Charakteristika ergeben sich jeweils deutlich reduzierte Anzahlen an auswertbaren Anlagen und damit größere Unsicherheiten in den funktionalen Zusammenhängen.
- Die spezifischen Gebäudekenndaten lagen aus Datenschutzgründen nicht vor.

Somit wurde in der Studie entschieden, dynamische Simulationsmodelle für die Ermittlung von Tageslastgängen und Gleichzeitigkeitsfunktionen in Abhängigkeit relevanter Einflussfaktoren zu nutzen. Dies gilt insbesondere für die Bewertung von Wasser-Wasser-Wärmepumpen sowie von Wärmepumpen in Mehrfamilienhäusern und Büros, für die nur unzureichende Messdaten vorlagen. Ebenso betrifft dies das zukünftige Flexibilitätspotenzial, zu dem keinerlei Mess- oder Betriebsdaten zur Verfügung standen.

6.1.2

Simulationsmodelle

Für die Erstellung eines repräsentativen Gebäude- und Anlagenpools im Stadtgebiet München wurden Einfamilienhäuser, kleine Mehrfamilienhäuser und kleine Bürogebäude als grundlegende Bautypen definiert. Neben der Festlegung von Gebäudehüllflächen und Nutzflächen wurde eine Differenzierung anhand des Baujahres, der Sanierungshistorie sowie des Niveaus der thermischen Sanierung vorgenommen. Dabei erfolgte eine Unterteilung in fünf Kategorien, wie am Beispiel der Ein- und Zweifamilienhäuser in Tabelle 4 gezeigt.

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

Tabelle 4: Bandbreiten (Ober- und Untergrenze) spezifischer Heizwärmebedarfe der betrachteten Ein- und Zweifamilienhäuser in Abhängigkeit des Baujahrs und des angenommenen Sanierungsplans bis 2045.

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 (Montag bis Freitag) und Wochenenden (Samstag und Sonntag)
4. Die Raumtemperaturen während An- und Abwesenheiten, mögliche Absenkungen 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 (mittels SynPRO Simulator des Fraunhofer ISE)

Aus den beschriebenen Variationsmöglichkeiten wurden auf Basis eines angepassten Klimadatensatzes des Jahres 2012 für den Standort München Wärmebedarfszeitreihen in 15-Minuten-Auflösung mithilfe der Simulationssoftware TRNSYS erstellt. Die dynamische Betrachtung ermöglichte es dabei unter anderem, ein Auskühlen der Gebäudemasse über mehrere Tage sowie den Einfluss von Lüftung und Nachtabenkung innerhalb eines Tages zu berücksichtigen.

Für die Abbildung der Anlagentechnik und deren Regelung wurde das Fraunhofer-IEE-Modell microScope verwendet. Im Hinblick auf das Wärmeversorgungssystem erfolgte eine Unterteilung der Gebäude in Fußbodenheizungen und Heizkörpersysteme. Für Fußbodenheizungen werden niedrige Vorlauftemperaturen (bis 40 °C bei -12 °C Tagesmitteltemperatur) mit flacher Heizkurve angesetzt; bei Heizkörpersystemen wurden Heizkurven abhängig vom Sanierungsstand gewählt. Im teilsanierten Gebäude (inkl. Heizkörperaustausch) wurden Vorlauftemperaturen von 55 °C implementiert.

Für die eigentliche Abbildung der Wärmepumpen wurden Herstellerkennlinien für Wärmeleistung, elektrische Leistung und COP samt ihrem jeweiligen Teillastverhalten berücksichtigt. Für alle Gebäude wurden in der Referenzvariante kleine Trinkwarmwasserspeicher von 50 Litern pro Person vorgesehen; Systeme mit Heizkörpern erhielten zusätzlich Pufferspeicher mit einem Volumen von 30 Litern pro kW_{th} Wärmepumpenleistung. Die Möglichkeit einer elektrischen Nachheizung wurde sowohl für die Trinkwarmwasserbereitung als auch für die Gebäudeheizung berücksichtigt.

Es wurden Jahressimulationen auf ¼-Stunden-Basis für den Standort München durchgeführt, und zwar für das historische Wetterjahr 2012, das mit Tagesmitteltemperaturen von etwa -12 °C über mehrere Tage (Auskühlen) einen Extremfall darstellt. Insbesondere die kalte Phase Anfang Februar ist in diesem Wetterjahr repräsentativ sowohl für die Auslegung der Verteilnetze am Standort München als auch für die Wechselwirkungen mit dem Strommarkt. Dieses Jahr wird auch in Analysen der Übertragungsnetzbetreiber zum Netzentwicklungsplan verwendet. Es weist eine europaweit ausgeprägte Dunkelflaute auf.

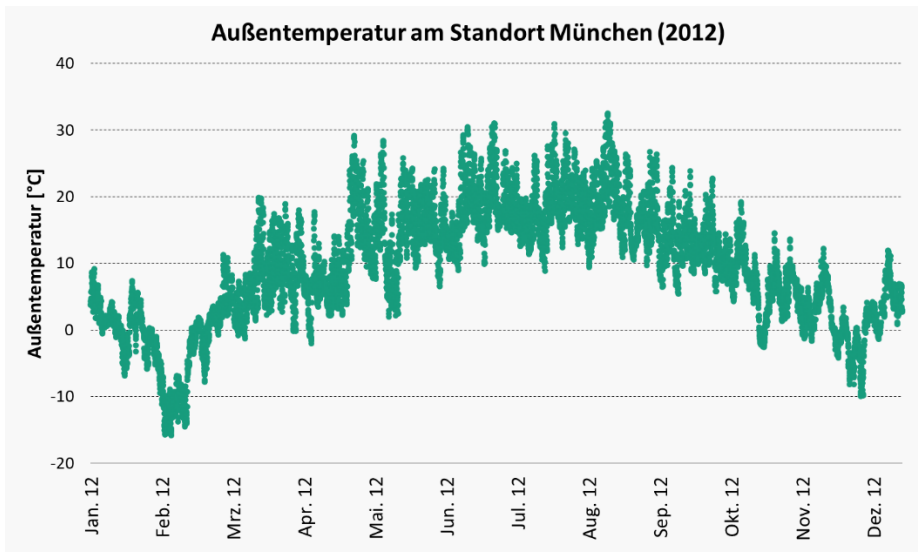


Abbildung 29: Außentemperatur am Standort München im historischen Wetterjahr 2012.

Am Standort München sind aufgrund der guten Bedingungen für Brunnen Wasser-Wasser-Wärmepumpen verbreiteter als Sole-Wasser-Wärmepumpen (Sonde, Kollektor), weshalb sie in dieser Studie ebenfalls betrachtet werden. Es wurde ein repräsentatives saisonales Profil der Grundwassertemperatur gewählt – basierend auf dem typischen Jahresverlauf für den Standort München gemäß Abbildung 30.

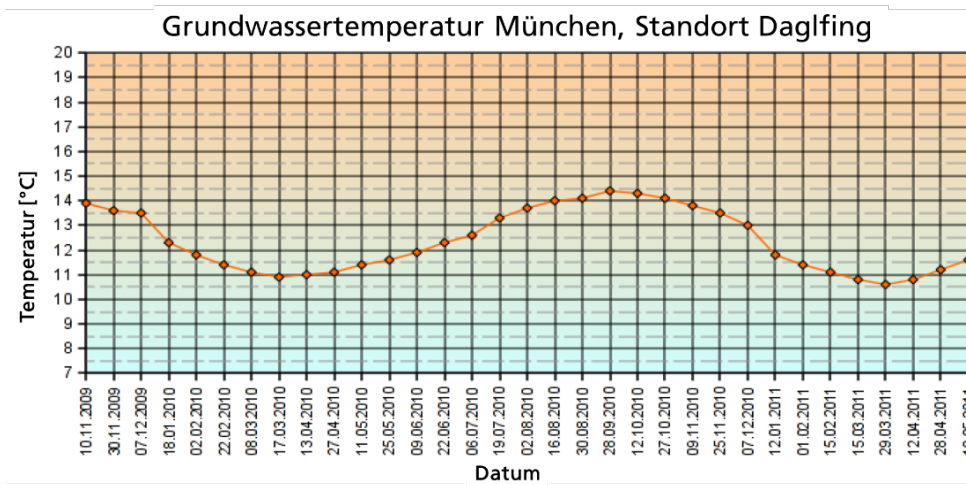


Abbildung 30: Typischer Verlauf der Grundwassertemperatur für den Standort Daglfing in München nach [6].

Die Simulation erfolgte auf Basis einzelner Gebäude. Die Verteilung bzw. Gewichtung von Baualterklassen einschließlich Effizienzstandard, Auslegung und Nutzerverhalten innerhalb eines Wärmepumpenkollektivs wurde iterativ ermittelt, um die Ergebnisse des aggregierten Betriebsverhaltens aus den Messdaten im Bereich von +20 °C bis -5 °C Tagesmitteltemperatur nachzubilden. Die Simulation der Gebäude (siehe Abbildung 31) mittels des Modells microSCOPE beinhaltet jeweils eine vorgelagerte dynamische Gebäudesimulation (in TRNSYS) des Raumwärmebedarfs für das reale Wetter im Jahr 2012 in München sowie stochastische Zapfprofile. Die Wärmelastdeckung wird in 15-Minuten-Mittelwerten über detaillierte technische Parameter von Wärmepumpe und Wärmespeichern sowie über den Heizstab abgebildet. Mit der Simulation wurde eine Bandbreite einzelner Stromverbrauchszeitreihen ermittelt und mittels eines Monte-Carlo-Verfahrens letztlich Gleichzeitigkeitsfunktionen bestimmt.

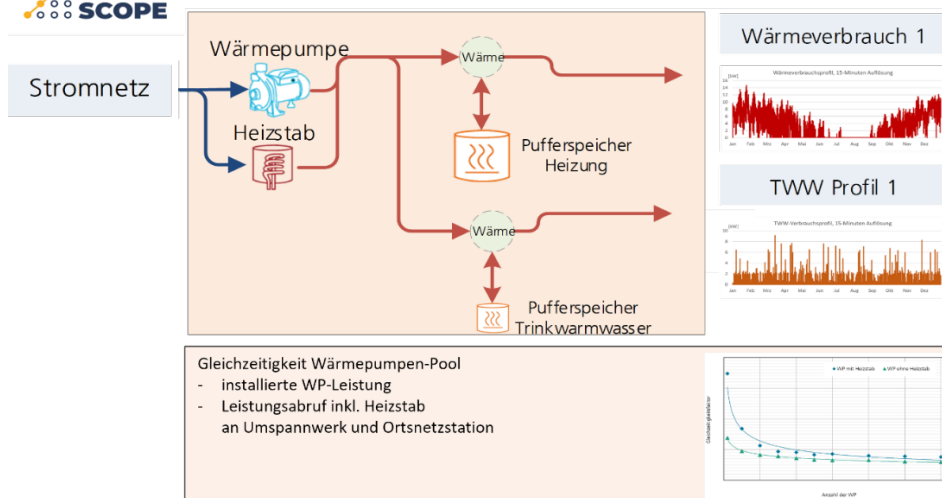


Abbildung 31: Veranschaulichung der Simulationsmethodik.

Konkret wurde folgendes Vorgehen gewählt:

- Luft-Wasser-WP in Ein- und Zweifamilienhäuser (EZFH):
 1. Validierung der Simulationsergebnisse mit Messdatenergebnissen für Luft-Wasser-WP bei einem Gebäudemix aus hauptsächlich Bestandsgebäuden und geringen Anteilen Neubauten:
 - Aufgrund der geringen Abhängigkeit der relativen Wärmeleistung des Anlagenpools von der Auslegungstemperatur eines Standorts erfolgte die Validierung der Modelle und insbesondere der Verteilung der Bivalenttemperaturen auf Basis der gemessenen Tageslastgänge, fokussiert auf -5 °C im Ein- und Zweifamilienhaus (EZFH).
 - Simulative Extrapolation der Tageslastgänge auf -10 °C und -12 °C .
 2. Auftrennung in zwei Cluster: »Vollsaniert/Neubau« & »Teilsaniert«
 - Vollsaniert/Neubau: tendenziell inklusive Fassadendämmung, da insbesondere bei freistehenden EFH (Massenmarkt) das Außenfläche-/Volumenverhältnis einen hohen Einfluss der Fassade bedingt.
 - Teilsaniert: Annahme einer maximalen Vorlauftemperatur von 55 °C , z. B. durch Maßnahmen an Fenstern, der obersten Geschosdecke oder an Heizkörpern.
- Andere Wärmepumpen-Gebäude-Kombinationen:
 - Bei MFH wären tendenziell mehr Cluster sinnvoll (günstiges Verhältnis von Außenfläche zu Volumen, geringerer Einfluss der Fassade). Der Fokus der Studie liegt aber auf dem Massenmarkt (EFH), weshalb auch für MFH vereinfacht die beiden Cluster »Vollsaniert/Neubau« und »Teilsaniert« gewählt wurden.
 - Die Simulationen für Wasser-Wasser-WP, kleine Mehrfamilienhäuser (KMFH) und Bürogebäude erfolgten ohne direkte Validierung. Auf Basis der validierten Häufigkeitsverteilungen zur Auslegung und zum Betriebsverhalten der Luft-Wasser-Wärmepumpen in EZFH wurden Annahmen bzw. Anpassungen vorgenommen.

7.1

Messwertbasierte Tageslastprofile

Aus Vertriebsicht (Strombeschaffung für temperaturabhängige Lasten) sind für Wärmepumpen sowohl die mittlere elektrische Leistung eines Tages als auch der zeitliche Verlauf der elektrischen Bezugsleistung über den Tag von Relevanz. Da für den Betrieb von Wärmepumpen die Außentemperatur die dominierende Einflussgröße ist, werden die zu verwendenden Tageslastprofile typischerweise getrennt für unterschiedliche Tagesmitteltemperaturen dargestellt. Das derzeit von den Stadtwerken München verwendete normierte Tageslastprofil für Wärmepumpen zeigt Abbildung 32. Zu erkennen sind die bislang angenommenen vergleichsweise geringen Variationen über den Tag; lediglich in den Nachmittagsstunden mit in der Regel höheren Außentemperaturen werden geringere Stromleistungen angesetzt. In dieser Studie werden mithilfe von Messdaten neue Wärmepumpen-Lastprofile ermittelt und hierbei wesentliche Einflussparameter auf die Höhe und den Verlauf der Lastprofile berücksichtigt.

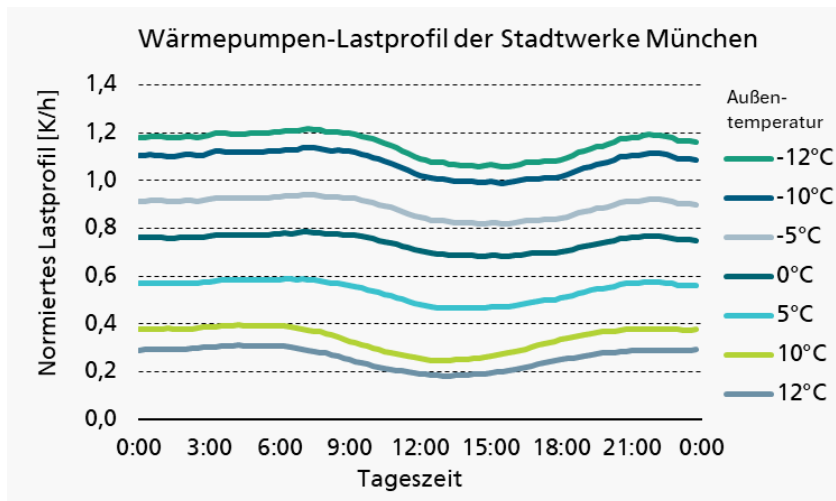


Abbildung 32: Aktuell veröffentlichtes Tageslastprofil für Wärmepumpen der Stadtwerke München, basierend auf [7].

Für die Wärmepumpen-Tageslastprofile wurden neun Temperaturklassen in Bezug auf die tagesmittlere Außenlufttemperatur definiert. Diese bestehen aus sieben Klassen, die jeweils eine Breite von 5 K abdecken und im Temperaturbereich zwischen -10 °C und 25 °C liegen. Zusätzlich gibt es eine Klasse für Temperaturen, die gleich oder unter -10 °C liegen, sowie eine weitere für Temperaturen über 25 °C.

Die Messdaten der 59 Wärmepumpenanlagen aus dem Projekt WPQS, die im Zeitraum vom 01.01.2020 bis 31.07.2024 erfasst wurden, wurden in die zuvor beschriebenen Temperaturklassen eingeordnet. Dabei wurden ausschließlich ganztägig lückenlose Daten berücksichtigt. Sieben der insgesamt 66 Anlagen aus dem Projekt WPQS wurden aufgrund fehlender Angaben zu den Prüfpunkten und des Referenzwerts von der Auswertung ausgeschlossen. Abbildung 33 zeigt die kumulierte Häufigkeitsverteilung der Anlagen und der Tage mit lückenlosen Messdaten in den einzelnen Temperaturklassen. Insgesamt verfügen acht Wärmepumpenanlagen über Messdaten von 14 Tagen bei einer tagesmittleren Außenlufttemperatur unter -10 °C. Im Temperaturbereich zwischen -10 °C und -5 °C stehen 320 Tage Messdaten von 47 Anlagen für die Auswertung zur

Verfügung. Zum Vergleich: Im Temperaturbereich zwischen 5 °C und 10 °C liegen 13.575 Tage Messdaten aus allen 59 Anlagen vor.

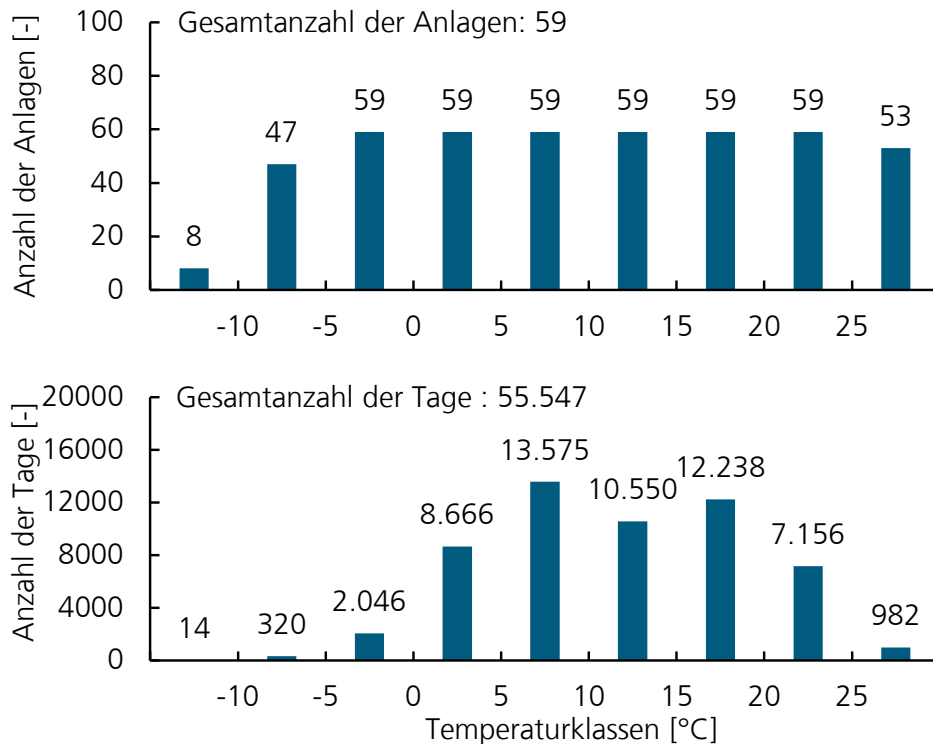


Abbildung 33: Datenverfügbarkeit der 59 Wärmepumpenanlagen aus dem Projekt WPQS in den verschiedenen Temperaturklassen.

Die normierten Tageslastprofile je nach Temperaturklasse auf Basis der Messdaten aus dem Projekt WPQS sind in Abbildung 34 dargestellt. Während der Heizperiode mit niedrigen Außentemperaturen zeigt sich ein ausgeprägter tageszeitabhängiger Verlauf, der einen Leistungspeak morgens und abends sowie eine Nachtabsenkung aufweist. Im Temperaturbereich zwischen -10 °C und -5 °C erreicht der Leistungspeak, ohne Berücksichtigung der Heizstabelleistung, eine normierte elektrische Leistung von 0,54. Mit steigender Außentemperatur verflachen sich die Tageslastprofile. Im Temperaturbereich über 25 °C liegt der normierte Leistungspeak lediglich bei 0,05. Der Einfluss des Heizstabbetriebs auf die Tageslastprofile ist nur im Bereich sehr niedriger Außentemperaturen zu beobachten. Im Temperaturbereich zwischen -10 °C und -5 °C beträgt der Leistungspeak der Wärmepumpen einschließlich Heizstäben 0,67 und ist damit etwa 24 % höher als der Leistungspeak ohne Heizstabelleistung.

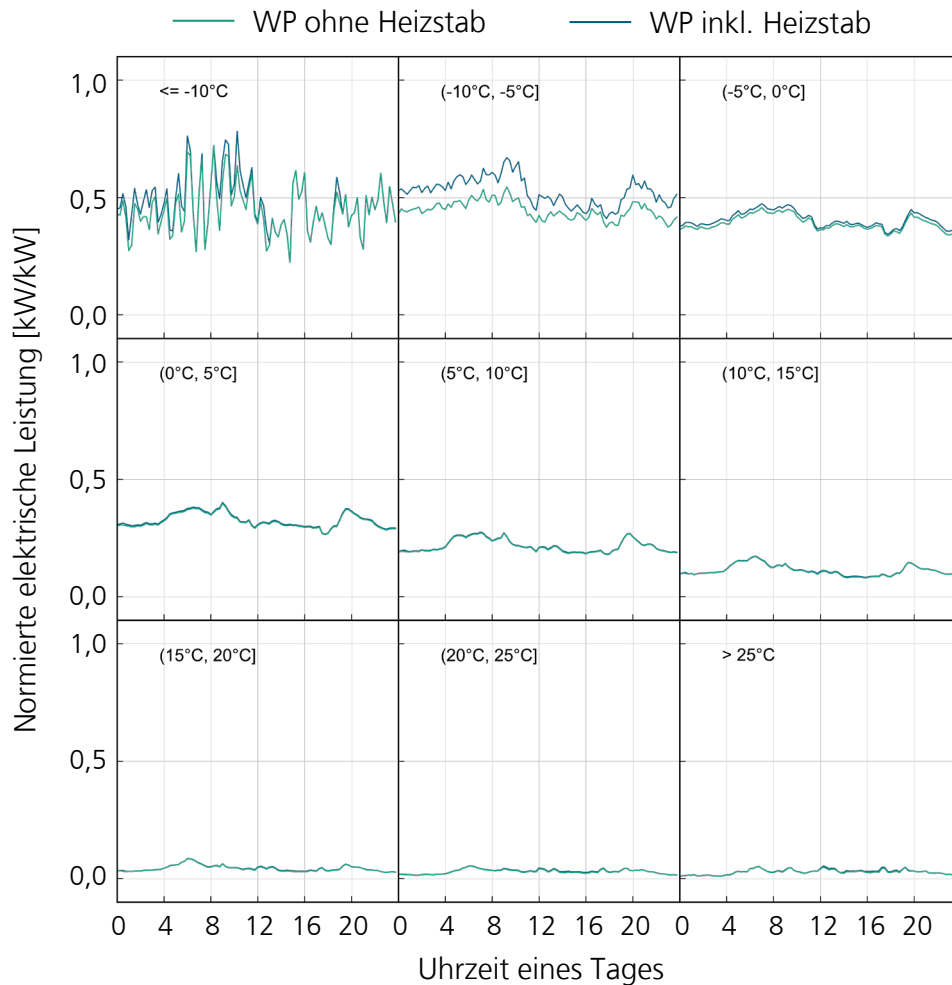


Abbildung 34: Tageslastprofile für verschiedene Temperaturklassen auf Basis der Messdaten der 59 Wärmepumpenanlagen aus dem Projekt WPQS – normierte Leistung bezogen auf Betriebspunkt A-7/W55.

Im Gegensatz zum derzeit bei den Stadtwerken München verwendeten normierten Lastprofil zeigt die Gesamtheit der WPM-Systems-Wärmepumpen (LW-WP) von Stiebel-Eltron ein deutlich ausgeprägteres tageszeitabhängiges Verhalten – wie in Abbildung 35 links dargestellt. Insgesamt sind die absoluten Niveaus bei den hier betrachteten Wärmepumpen deutlich niedriger, was aber insbesondere an der unterschiedlich gewählten Normierung liegt. Darüber hinaus zeigen die realen Betriebsdaten nachts eine signifikante Reduktion der elektrischen Bezugsleistung; der Morgenpeak ist mit ca. 50 % höheren Werten deutlich ausgeprägter. 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

Über den Gesamtpool der WPM-Systems-Anlagen war eine Auswertung der Tageslastgänge nur bis $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ möglich (was einem Temperaturbereich von $-7,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ bis $-2,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ entspricht). Unter Berücksichtigung der Laufzeit der Heizstäbe gemäß Abbildung 36 für Heizen und Trinkwarmwasserbereitung sowie einer angenommenen mittleren Heizstableistung entsprechend Tabelle 1 ergibt sich die in Abbildung 35 dargestellte Schätzung des Tageslastgangs über den gesamten Außentemperaturbereich (gestrichelte Linien). Die Werte aus der Grafik dienen innerhalb dieser Studie als Benchmark für die simulationsbasierten Tageslastprofile. Aus den messdatenbasierten Profilen lässt sich ein maximaler Wert von 0,45 bei $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ inkl. Heizstab ablesen. Für die geringe Anzahl an Messdaten an noch kälteren Tagen (gestrichelte Linie für $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ inkl. Heizstab) wurden Spitzenwerte von über 0,7 abgeschätzt.

Die Tageslastgänge aus dem Stiebel-Eltron-Betriebsdatenpool, getrennt für Heizen sowie Trinkwarmwasserbereitung, zeigt Abbildung 37. Erkennbar ist ein sehr großer Unterschied in der Trinkwarmwasserbereitung zwischen Tag und Nacht, bei insgesamt jedoch deutlich niedrigerem absolutem Leistungsniveau im Vergleich zum Heizen. Die Außentemperaturabhängigkeit ist hierbei zum einen durch veränderte COPs, zum anderen aber auch durch saisonale Schwankungen der Kaltwassertemperaturen zu erklären. Insbesondere in Bestandsgebäuden spielt die Trinkwarmwasserbereitung nur eine untergeordnete Rolle für die Tageslastgänge.

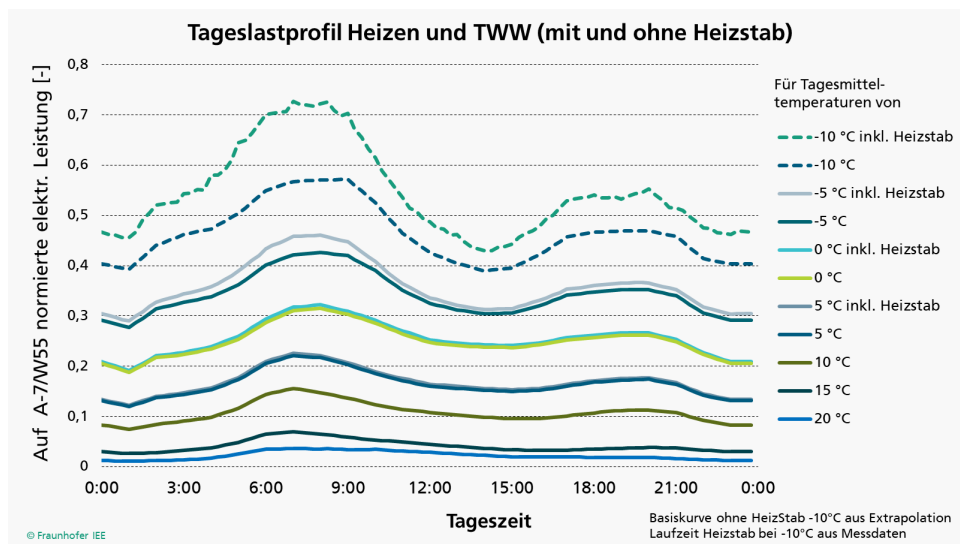


Abbildung 35: Tageslastprofile der auf den Prüfpunkt A-7/W55 normierten elektrischen Leistung des Gesamtpools der WPM-Systems-Anlagen (LW-WP) mit Extrapolation auf kalte Tage unter Berücksichtigung der gemessenen Laufzeiten der Heizstäbe an kalten Tagen.

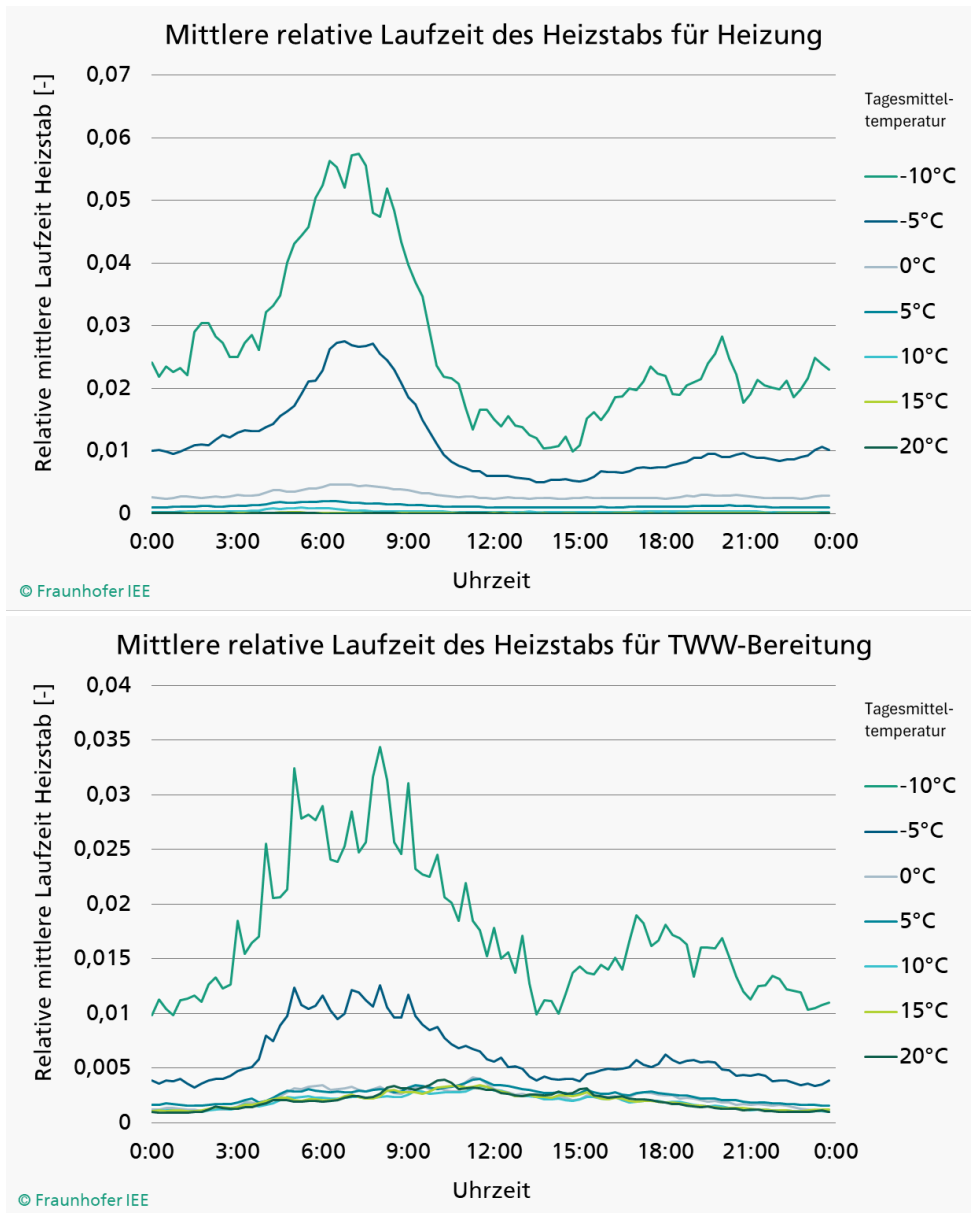


Abbildung 36: Tageslastprofil des Heizstabbetriebs bezogen auf die Laufzeit im 15-Minuten-Intervall. (oben) Heizen, (unten) Trinkwarmwasserbereitung.

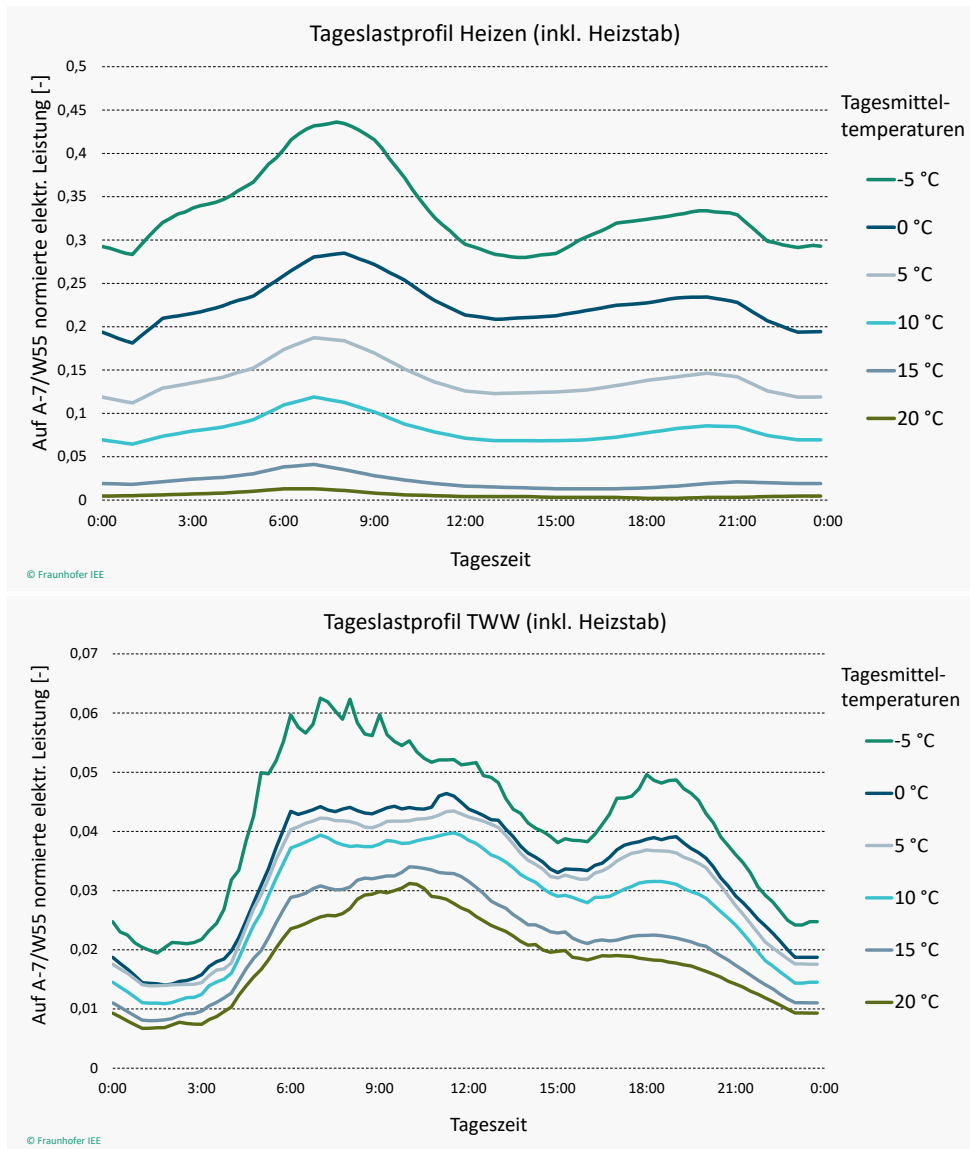


Abbildung 37: Tageslastprofile des LW-WP-Gesamtpools, getrennt für Heizen und TWW.

Abbildung 38 zeigt die aus dem Stiebel-Eltron-Betriebsdatenpool generierten Tageslastgänge in Abhängigkeit der Auslegung bzw. des Verhältnisses der Wärmepumpenleistung zum mittleren Wärmebedarf des jeweiligen Gebäudes. Wie zu erwarten, weist der in Abbildung 26 als »unterdimensioniert« bezeichnete Anlagenpool in den Tageslastprofilen deutlich höhere normierte Leistungen auf, als »überdimensionierte« oder »passende« Anlagen. Insbesondere ist bei »unterdimensionierten« Anlagen die Schwankungsbreite im Tagesprofil weniger ausgeprägt, da die fehlende Kapazität in den Hochlaststunden durch einen gleichmäßigeren Betrieb ausgeglichen wird.

Ein ähnliches Bild zeigt sich bei der Clusterung der LW-WP-Anlagen nach der Heizkurve (siehe Abbildung 39). Anlagen mit hohen und mittleren Heizkurven haben tendenziell höhere Tageslastprofile als Anlagen mit niedrigen Heizkurven, wie sie bei Fußbodenheizungen eingesetzt werden. Der Hauptgrund ist hier in der geringeren Wärmepumpeneffizienz bei hohen Vorlauftemperaturen zu sehen, die selbst bei gleichem Wärmebedarf zu einem höheren Stromverbrauch führt.

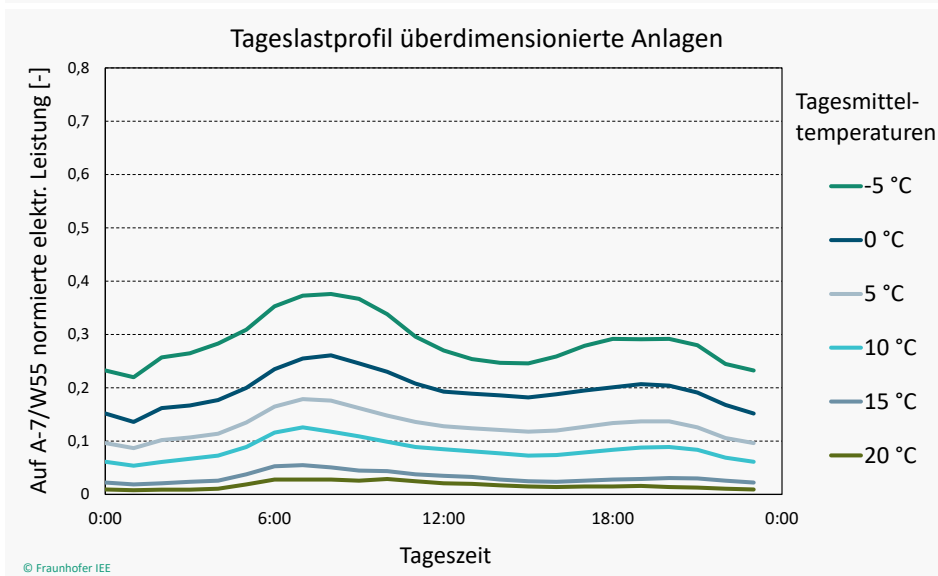
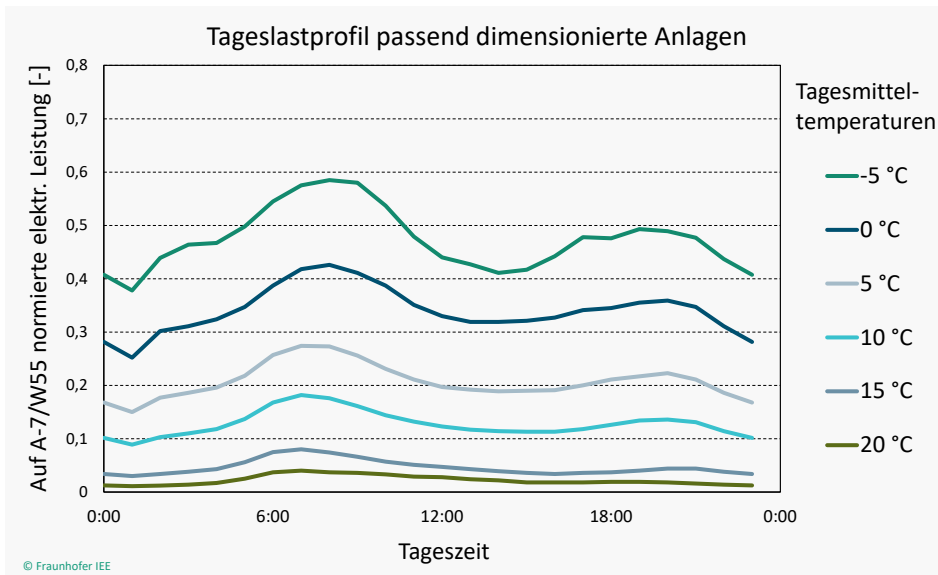
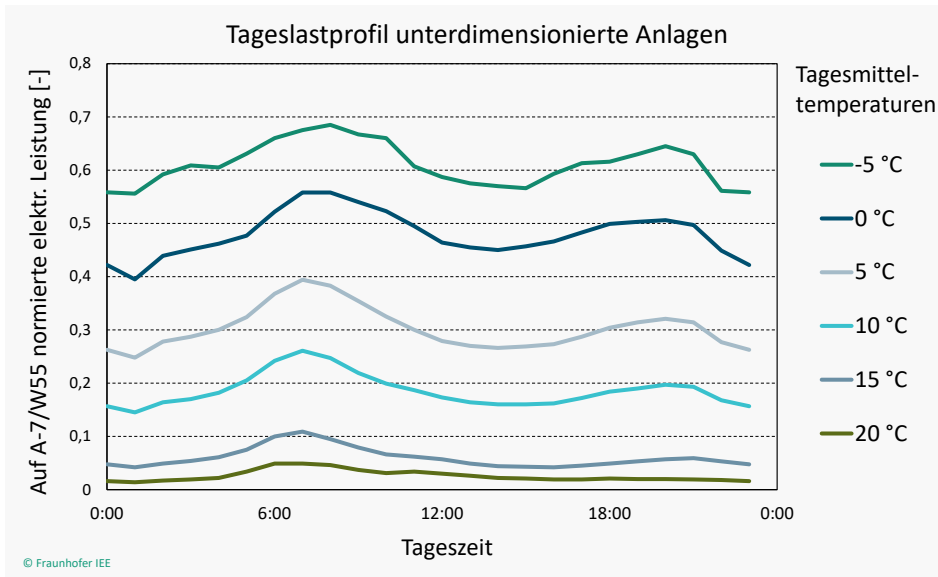


Abbildung 38: Tageslastprofile in Abhängigkeit der Auslegung (exkl. Heizstäbe).

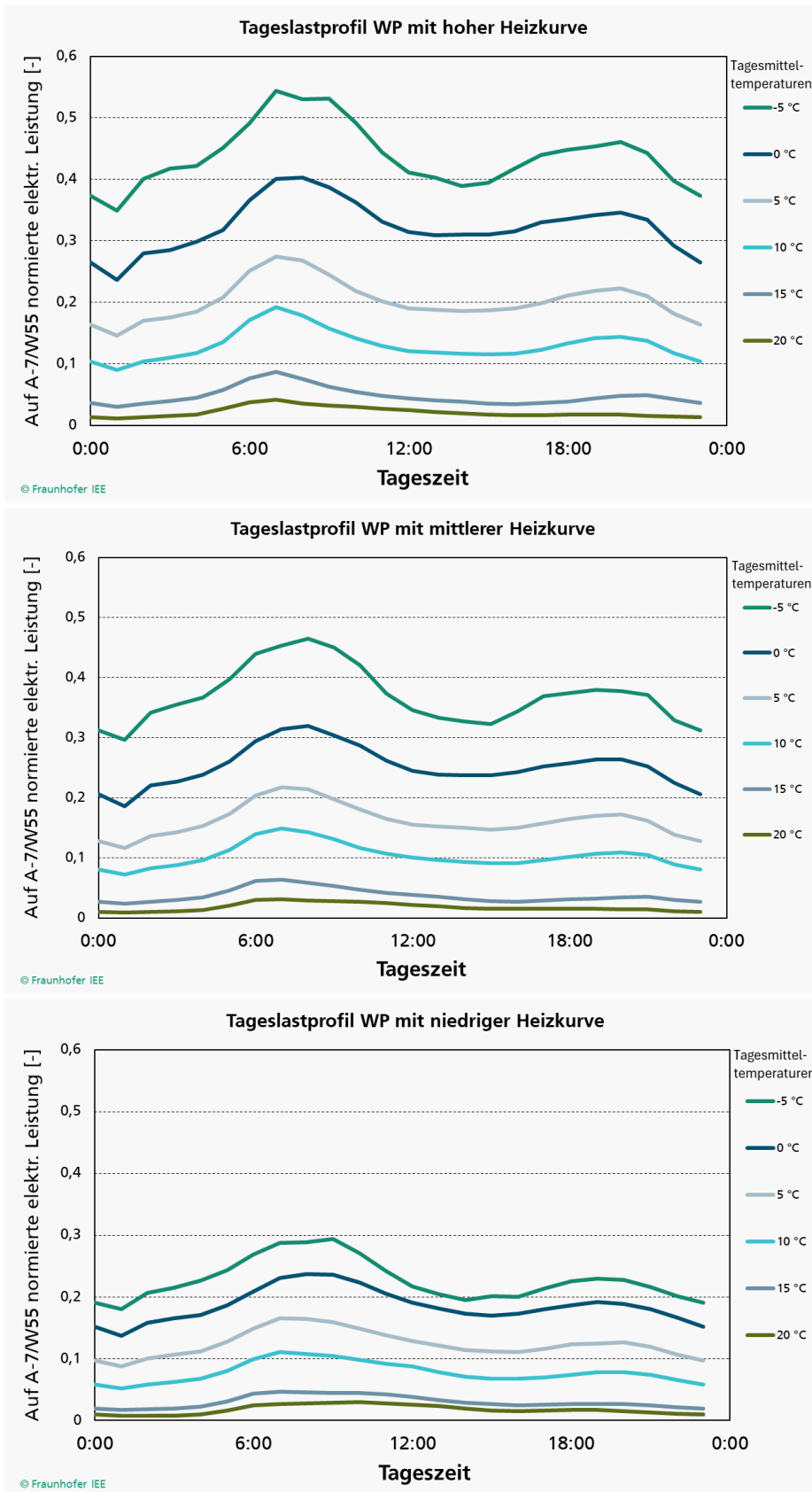


Abbildung 39: Tageslastprofile in Abhängigkeit der Heizkurve (exkl. Heizstäbe).

Die nachfolgenden Tageslastprofile stellen die finalen, für energiewirtschaftliche Prozesse nutzbaren Profile dieser Studie dar, die auf Basis der Erkenntnisse der messdatenbasierten Profile und Simulationen ermittelt wurden. Als Ergebnis der Simulationen zeigt sich gegenüber den messwertbasierten Tageslastprofilen (siehe Abbildung 40 und Abbildung 35) für Luft-Wasser-WP im EZFH im Mix über alle Gebäudearten (»Vollsaniiert/Neubau« und »Teilsaniert«) eine hohe Übereinstimmung. Die simulationsbasierten Tageslastprofile können somit als valide bestätigt werden. Eine Kalibrierung der Simulationsdaten auf die Messdaten wurde entsprechend nicht vorgenommen. Aufgrund der geringeren Anzahl an Simulationsdaten gegenüber den Messdaten treten zwischen den 15-Minuten-Zeitschritten kleinere Schwankungen auf, die sich bei einer größeren Anzahl stochastischer Verhaltensvarianten noch weiter glätten würden.

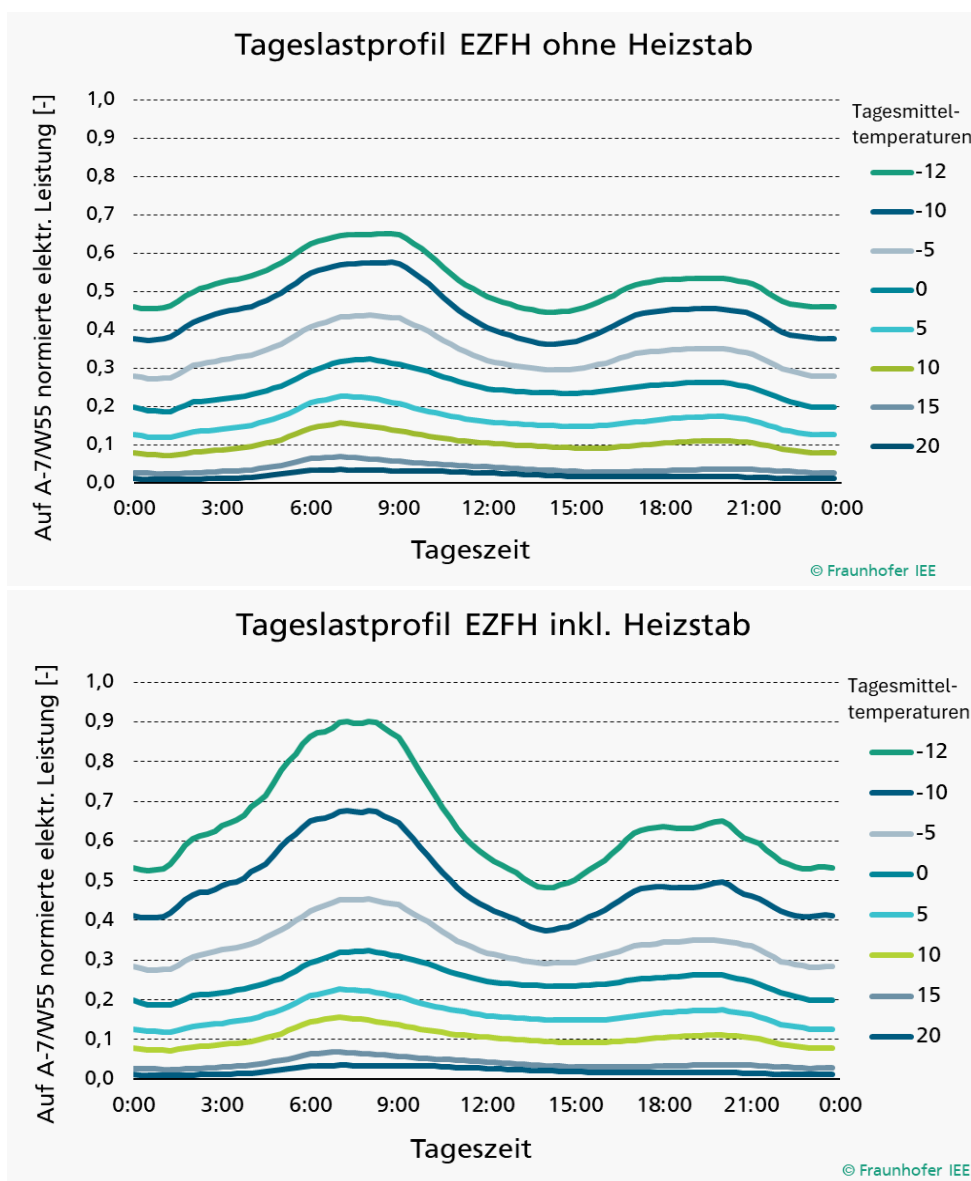


Abbildung 40: Simulationsbasierte Tageslastprofile für den Gesamtpool an LW-WP in EZFH (Gebäudemix), (oben) ohne Heizstab, (unten) mit Heizstab.

Beim Vergleich der Wärmepumpentypen (siehe Abbildung 41) zeigen sich deutlich geringere relative Leistungen bei Wasser-Wasser-WP gegenüber Luft-Wasser-WP – aufgrund der Dimensionierung (i.d.R. monovalent mit fast keinem oder gar keinem Heizstabeinsatz) und besseren COPs bei niedrigen Außenlufttemperaturen (quasi-konstante Quelle).

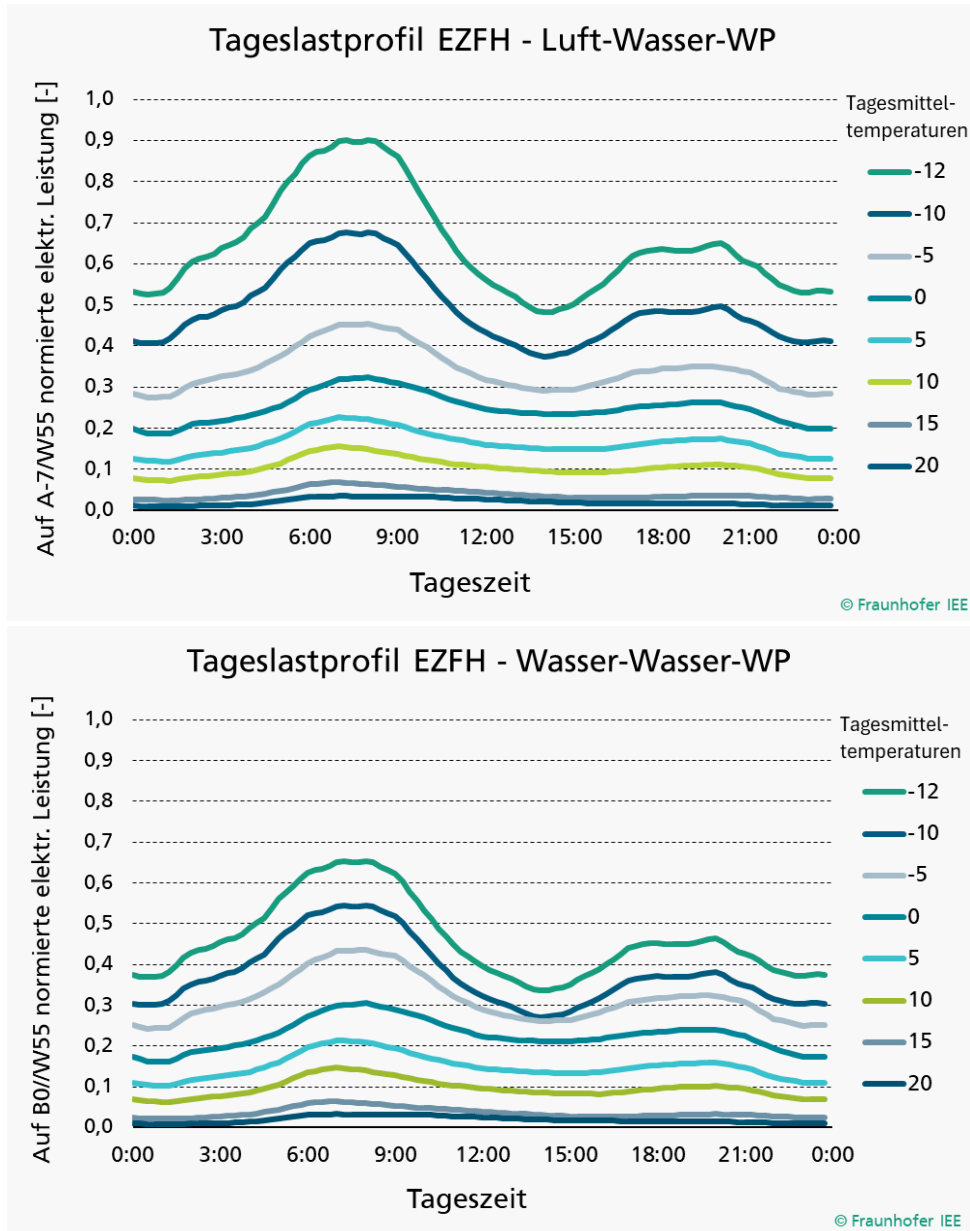


Abbildung 41: Tageslastprofile nach dem Wärmepumpentyp (EZFH Gebäudemix). Oben: Luft-Wasser-WP, unten: Wasser-Wasser-WP

Beim Vergleich im Hinblick auf die Gebäudeeffizienz (siehe Abbildung 42) zeigt sich bei vollsanierten Gebäuden bzw. Neubauten eine größere Schwankung im Tageslastgang gegenüber einer Teilsanierung, da der Einfluss von Lüftung und Nachtabsenkung sowie der TWW-Bereitung höher ist und zudem eine höhere Heizgrenztemperatur sowie tendenziell größer dimensionierte Wärmepumpen vorliegen. Aufgrund des geringen absoluten Anteils vollsanierter Gebäude bzw. Neubauten am gesamten Stromverbrauch eines Wärmepumpenpools ist der Unterschied zwischen dem gesamten Gebäudemix und der Gruppe „Teilsanierung“ gering.

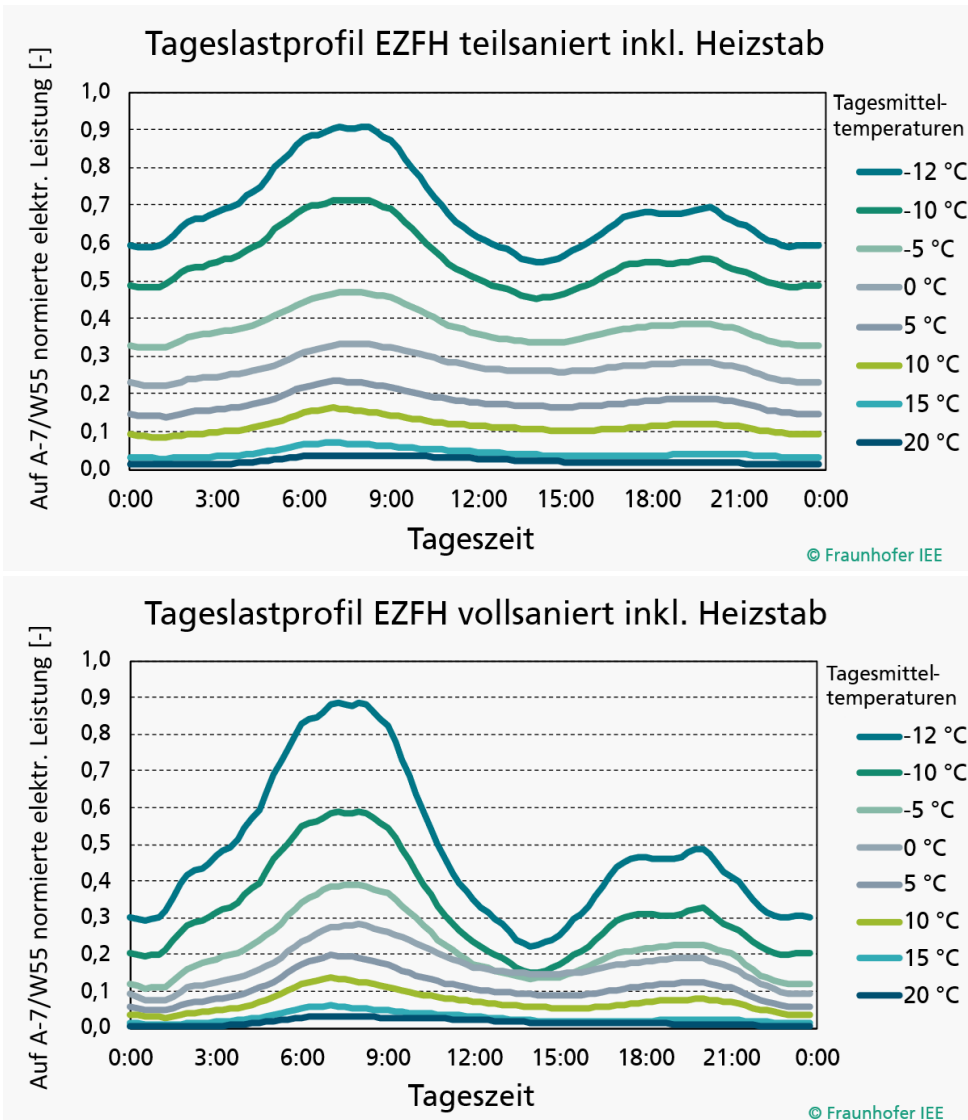


Abbildung 42: Tageslastprofile nach der Gebäudeeffizienz für Luft-Wasser-WP in EZFH.

Beim Vergleich der Profile je nach Gebäudegröße (siehe Abbildung 43) zeigen sich geringere normierte Leistungen bei kleinen Mehrfamilienhäusern (KMFH) im Vergleich zu Ein- und Zweifamilienhäusern (EZFH), was auf die tendenziell größer dimensionierten Wärmepumpen (mit begrenzter elektrischer Heizstabileistung) sowie auf größere Abweichungen zwischen der angenommenen und der tatsächlich auftretenden maximalen Heizlast in KMFH zurückgeführt werden kann.

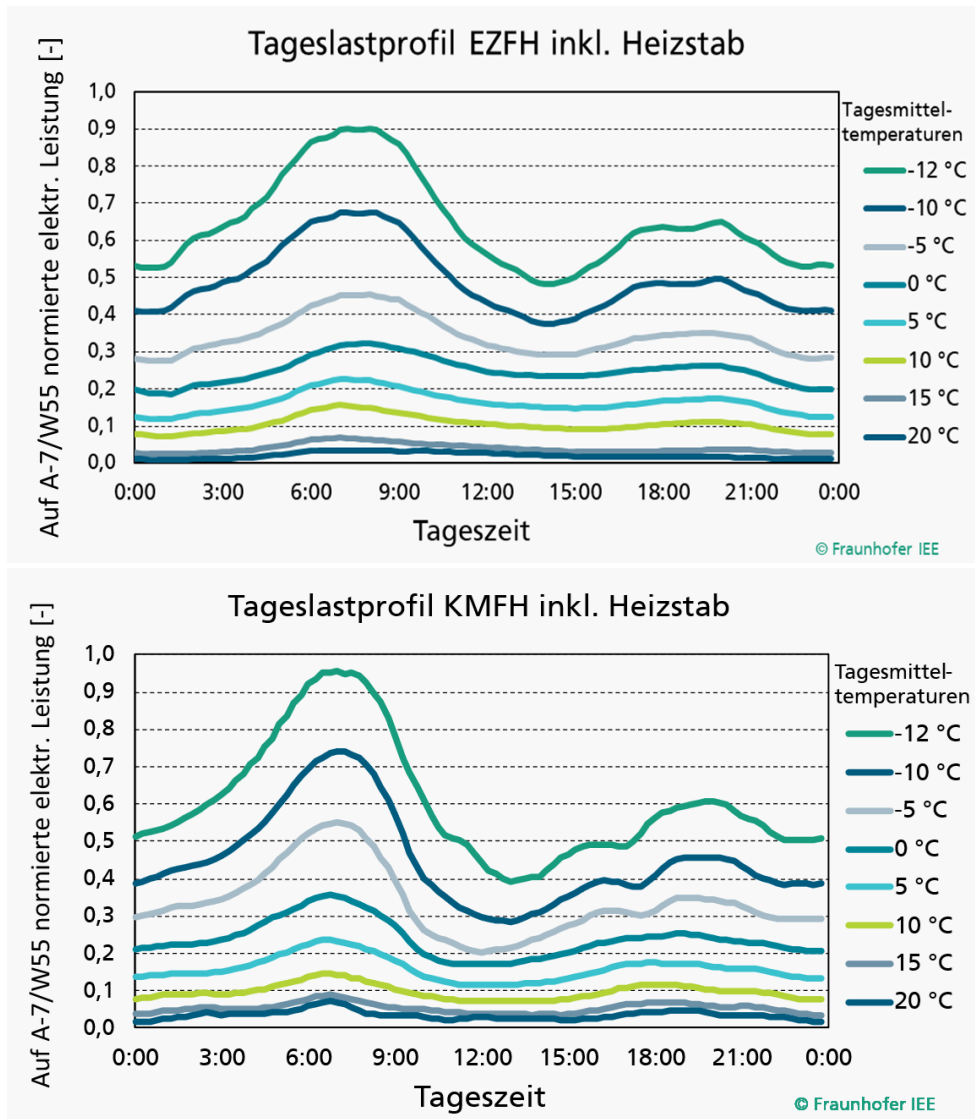


Abbildung 43: Tageslastprofile nach der Gebäudegröße für Luft-Wasser-WP (Gebäudemix).

Beim Vergleich der Profile je nach Gebäudeart (siehe Abbildung 44) zeigen sich bei Bürogebäuden ausgeprägtere Tag-Nacht-Unterschiede, bedingt durch reduzierte Lüftung in der Nacht und eine kaum ausgeprägte Nachmittagsdelle aufgrund konstanter Anwesenheit. Für Büros wurden nur wenige Beispielgebäude simuliert. Zudem ist ohne Messdaten ein repräsentatives Nutzungsprofil mit entsprechenden Unsicherheiten behaftet. Eine Unterscheidung zwischen Wochentagen und Wochenenden wurde bei der Darstellung jeglicher Tageslastprofile nicht vorgenommen.

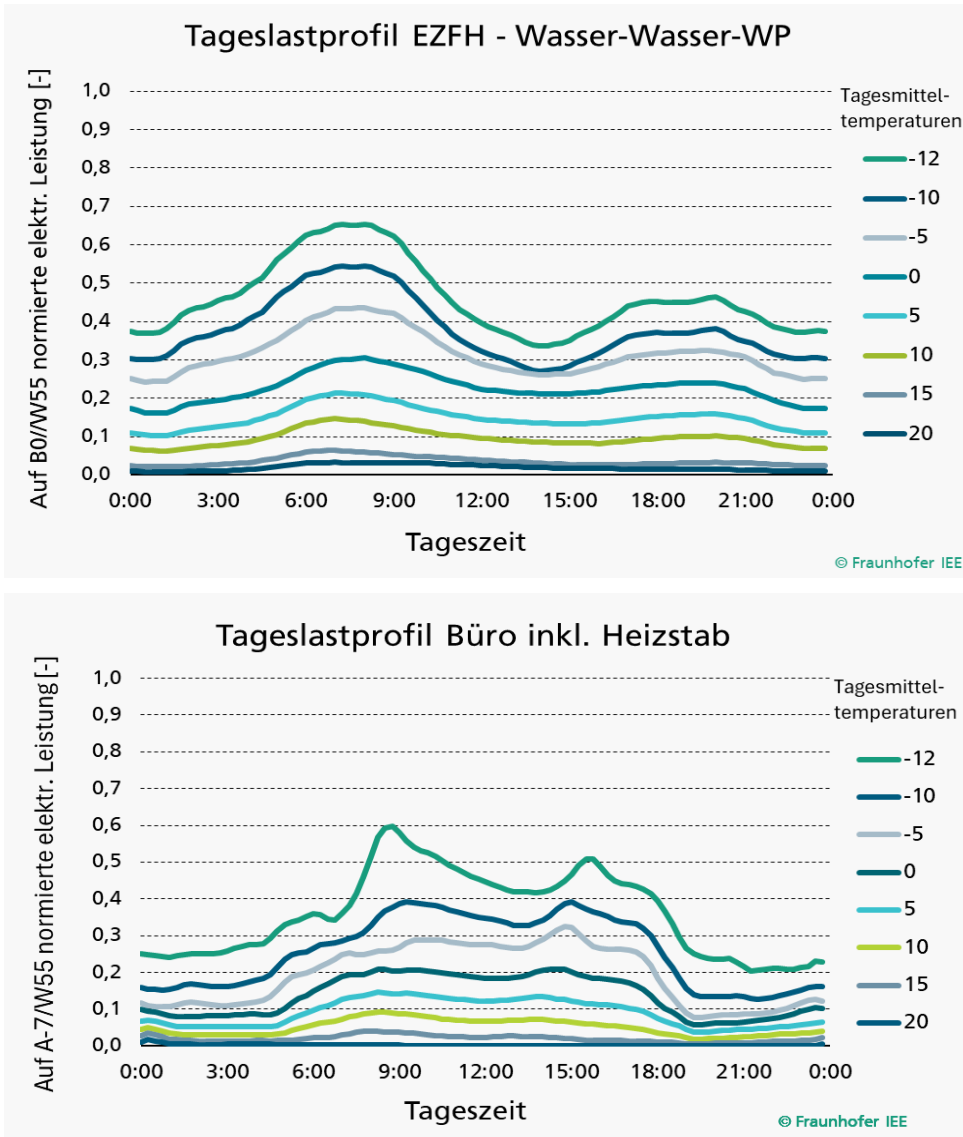


Abbildung 44: Tageslastprofile nach der Gebäudeart für Luft-Wasser-WP (Gebäudemix).

Abschließend sei darauf hingewiesen, dass anhand der Tageslastprofile sich nicht die gleichzeitige Höchstlast ablesen lässt. Dies liegt insbesondere daran, dass in den Tageslastgängen unterschiedlich ausgeprägte Tage hinsichtlich der Außentemperatur zusammengefasst werden (Amplitude, Bandbreite der Tagesmitteltemperatur, Zeitpunkt der tiefsten Tagestemperatur). Weiterhin treten im Gebäude Auskühlvorgänge über mehrere Tage auf, die im Tageslastgang zu einer Mittelung der maximalen Leistungen führen. Gleiches gilt für Tage mit unterschiedlichen solaren Gewinnen. Somit ist die gleichzeitige Höchstlast für ein Wärmepumpenkollektiv tendenziell höher als der Maximalwert der Tageslastgänge.

8 Gleichzeitigkeitsfunktionen

8.1 Messwertbasierte Gleichzeitigkeitsfunktionen

Infolge der steigenden Elektrifizierung der Wärmeversorgung im Gebäudesektor durch Wärmepumpen wird von zunehmenden Spitzenlasten in Stromnetzen ausgegangen. Bei einer höheren Anzahl von Wärmepumpen können Durchmischungs- bzw. Mittelungseffekte beobachtet werden, wodurch eine entsprechende Gleichzeitigkeit in der Netzplanung berücksichtigt werden kann. Hierfür werden üblicherweise Gleichzeitigkeitsfunktionen herangezogen.

Die nachfolgend dargelegten messwertbasierten Gleichzeitigkeitsfunktionen für den Standort München sind mit Unsicherheiten verbunden – u. a. da die zugrunde liegenden Messdaten von deutschlandweit verteilten Anlagen stammen. Auch simulationsbasierte Gleichzeitigkeitsfunktionen für einen spezifischen Standort sind mit Unsicherheiten behaftet, da aufgrund der eingesetzten Simulations- und Optimierungsmethodik nicht die gesamte Varianz von Anlagentechnik und Nutzerverhalten abgebildet werden kann. Um die Ergebnisse abzusichern, werden in dieser Studie sowohl messwertbasierte als auch simulationsbasierte Gleichzeitigkeiten ermittelt.

Auf Basis des Stiebel-Eltron-Betriebsdatenpools konnten für den Standort München 22 Anlagen ausgewertet werden (siehe Abbildung 45). Eine 15-Minuten-aufgelöste Auswertung der elektrischen Leistung von Wärmepumpe und Heizstab war aufgrund der Datenauflösung nicht möglich, sodass für eine erste Bewertung die relative Drehzahl der Wärmepumpen herangezogen wurde. Zu erkennen ist, dass die relative Drehzahl der 12 WPM-Systems-Anlagen Werte von bis zu 0,8 im Morgenpeak an kalten Tagen (bei einer Außentemperatur von -7 °C) erreicht, während die 10 LWZ-Anlagen Werte von bis zu 0,6 aufweisen. Hieraus ist zu vermuten, dass einige Anlagen mit maximaler Drehzahl laufen, der Heizstabeinsatz jedoch noch sehr gering ist.

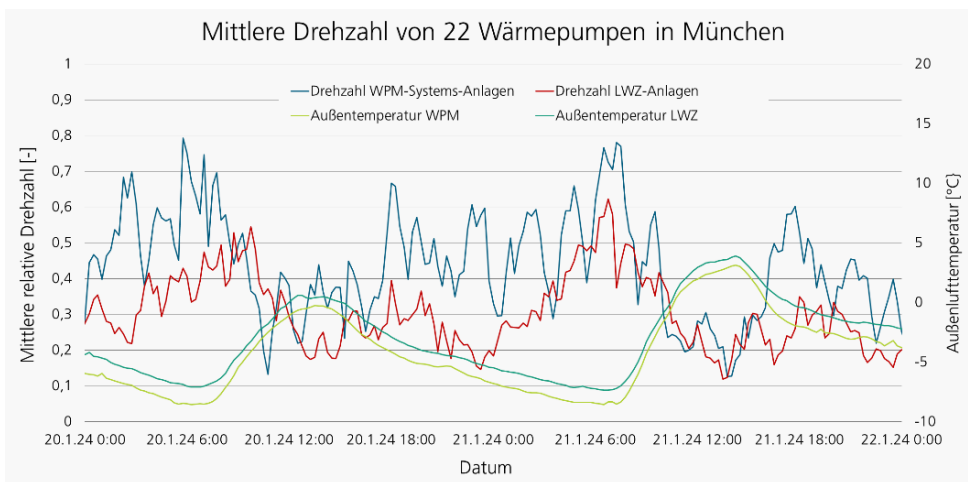


Abbildung 45: Wärmepumpenbetrieb am Standort München im Tagesmittelbereich von -5°C.

Eine messwertbasierte Gleichzeitigkeitsfunktion wurde in dieser Studie anhand einer Monte-Carlo-Analyse auf Basis der mehrjährigen Messdaten von 59 Wärmepumpen aus dem Projekt WPQS ermittelt. Dazu wurde zunächst ein Datensatz mit den Messdaten von 322 Tagen, an denen die tagesmittlere Außenlufttemperatur unter -5 °C lag, erstellt. Mit dem Zufallsverfahren „Latin Hypercube Sampling (LHS)“ wurden n zufällig ausgewählte Tageslastgänge aus diesem Datensatz kombiniert und die Gleichzeitigkeit berechnet. Dieser Vorgang wurde jeweils 50-mal wiederholt. Dadurch ergibt sich eine Wahrscheinlichkeitsverteilung der Gleichzeitigkeitsfaktoren für eine Anzahl von n Wärmepumpen.

In Abbildung 46 ist die Wahrscheinlichkeitsverteilung der Gleichzeitigkeitsfaktoren bei unterschiedlicher Anzahl von Wärmepumpen in Form von Boxplots dargestellt. Aufgrund der begrenzten Anzahl verfügbarer Wärmepumpenanlagen und der damit verbundenen eingeschränkten Heterogenität für das Monte-Carlo-Verfahren wird der Gleichzeitigkeitsfaktor lediglich für bis zu 60 Wärmepumpen ermittelt. Der »Kasten« im Diagramm repräsentiert den Bereich zwischen dem 25 %- und 75 %-Quantil und zeigt somit den Interquartilsabstand, der die mittleren 50 % der Daten umfasst. Die grüne Linie innerhalb des Kastens stellt den Median dar. Die »Whiskers«, also die Linien, die aus dem Kasten herausragen, zeigen die Spannweite der Daten an. Werte unterhalb des 2,5 %- und oberhalb des 97,5 %-Quantils werden als Ausreißer dargestellt und erscheinen als separate orangefarbene Punkte.

Für einzelne Wärmepumpen – ohne Berücksichtigung der Heizstabelleistung – liegt der Median des Gleichzeitigkeitsfaktors bei 1,01, während die zentralen 95 % innerhalb einer Bandbreite von 0 bis 1,48 variieren. Werte über 1 sind unter anderem auf die Teillastbedingungen des Referenzwertes A-7/W55 zurückzuführen. Mit steigender Anzahl von Wärmepumpen zeigt sich tendenziell eine Abnahme der Gleichzeitigkeitsfaktoren. Für 60 Wärmepumpen beträgt der Median der Gleichzeitigkeitsfaktoren bereits 0,55.

Der Heizstabbetrieb beeinflusst die Gleichzeitigkeit signifikant. Der Median des Gleichzeitigkeitsfaktors einschließlich Heizstab steigt um 11 % auf 1,12, während sich das 97,5 %-Quantil im Vergleich zum Wert ohne Heizstabelleistung mehr als verdoppelt. Der Median der Gleichzeitigkeitsfaktoren für 60 Wärmepumpen beträgt 0,66 und ist damit rund 20 % höher als ohne Heizstab.

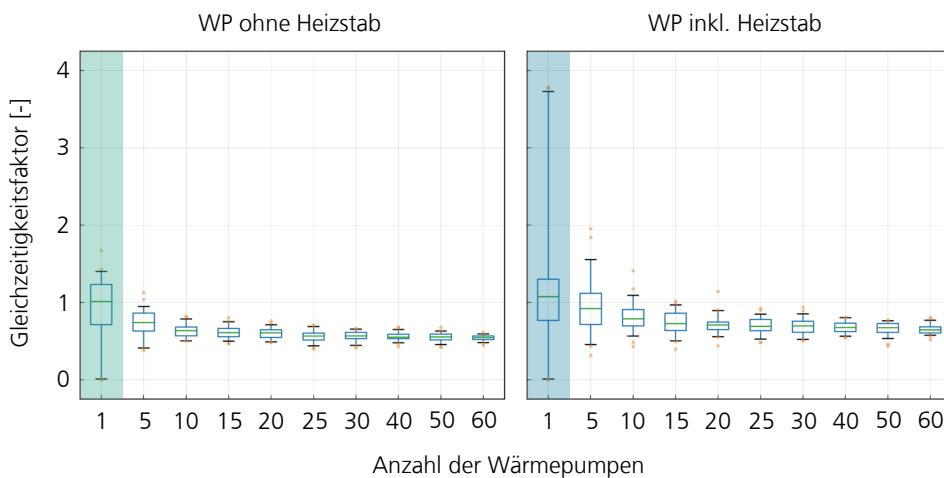


Abbildung 46: Wahrscheinlichkeitsverteilung der Gleichzeitigkeitsfaktoren bei unterschiedlicher Anzahl von Wärmepumpen im Außentemperaturbereich unter -5 °C (Datenbasis: Feldmessung der 59 Wärmepumpenanlagen aus dem Projekt WPQS).

Zur Ermittlung der Gleichzeitigkeitsfunktion wird das 95 %-Quantil der Wahrscheinlichkeitsverteilung verwendet. In Abbildung 47 sind Gleichzeitigkeitsfunktionen für Wärmepumpen ohne und mit Heizstabileistung dargestellt. Für den Bereich bis 15 Wärmepumpen wird eine Potenzfunktion angesetzt, während für den Bereich ab 15 Wärmepumpen eine lineare Funktion verwendet wird. Anhand der Gleichzeitigkeitsfunktion beträgt der Gleichzeitigkeitsfaktor bei 60 Wärmepumpen 0,59 ohne Heizstab und 0,76 einschließlich Heizstab.

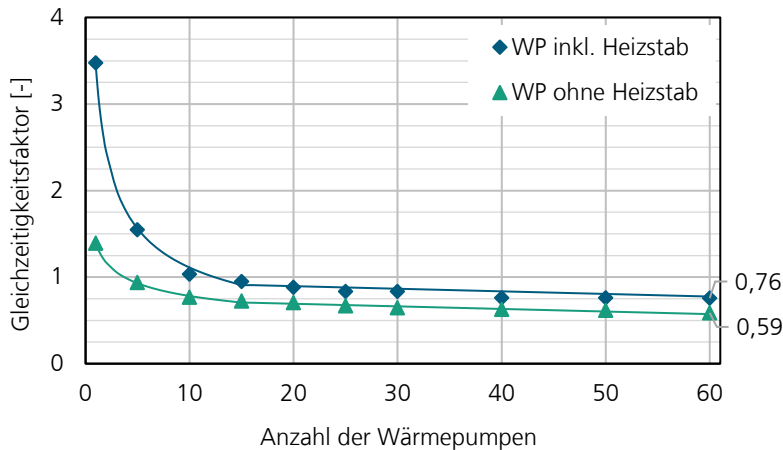


Abbildung 47: Messwertbasierte Gleichzeitigkeitsfunktion im Außentemperaturbereich unter -5 °C (Datenbasis: Feldmessung der 59 Wärmepumpenanlagen aus dem Projekt WPQS).

Extrapolationsverfahren auf Basis der WPM-Systems-Messdaten von Stiebel-Eltron

Auf Basis der Betriebswahrscheinlichkeiten an kalten Tagen, des ermittelten Tageslastgangs sowie des funktionalen Zusammenhangs des Heizstabeinsatzes in Abhängigkeit von der Außentemperatur wurden auch Gleichzeitigkeitsfaktoren für den Pool der WPM-Systems-Anlagen abgeschätzt. Abbildung 48 zeigt in den beiden rechten Diagrammen die abgeschätzten Gleichzeitigkeitsfaktoren für den Gesamtpool bei Tagesmitteltemperaturen von -5 °C, die in guter Übereinstimmung mit der zuvor gezeigten Monte-Carlo-Analyse für -5 °C liegen. Mit Hilfe einer Extrapolation wurde anschließend die Größenordnung der Gleichzeitigkeitsfaktoren für Tagesmitteltemperaturen von -12 °C abgeschätzt. Wie in Abbildung 48 links dargestellt, liegen diese Werte deutlich höher. Für den Gesamtpool von Luft-Wasser-Wärmepumpen im EZFH wird auf Basis der Extrapolation ein Gleichzeitigkeitsfaktor von ungefähr 1,2 für Tagesmitteltemperaturen von -12 °C ermittelt. Aufgrund der verwendeten Methodik ist dieser Wert jedoch mit einer größeren Unsicherheit behaftet.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass keine der verwendeten messwertbasierten Methoden eine direkte Bestimmung der Gleichzeitigkeit für einen Zeitraum von mehreren Tagen mit < -12 °C und für viele räumlich eng beieinander liegende Wärmepumpen in München ermöglicht. Die ermittelten Werte repräsentieren jedoch einen Anhaltspunkt, der mithilfe von Simulationen »validiert« werden kann. Simulationen erlauben zudem eine Clusterung nach verschiedenen Kriterien. Durch Anwendung der Monte-Carlo-Methodik kann letztlich der funktionale Zusammenhang zwischen der Anzahl installierter Wärmepumpensysteme und der Gleichzeitigkeit abgeleitet werden.

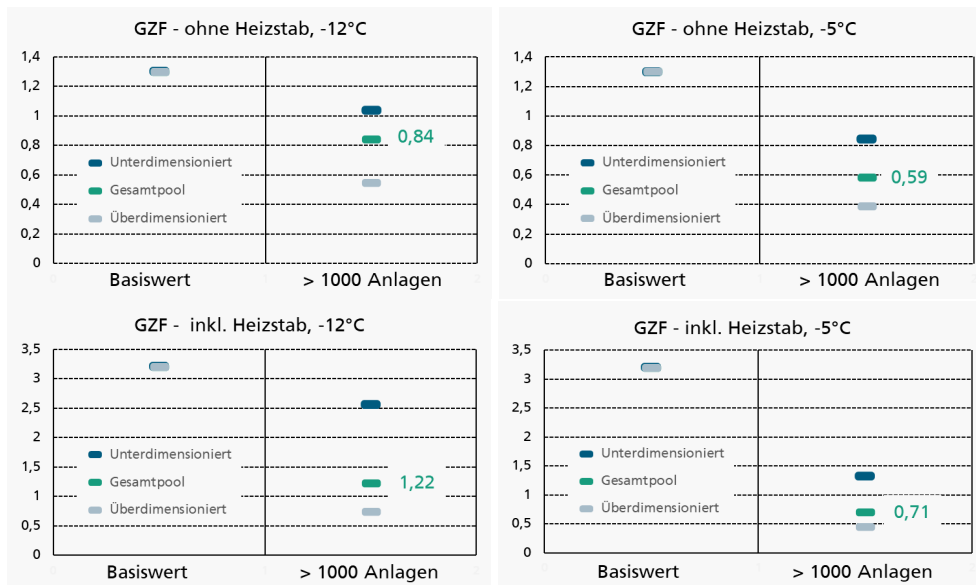


Abbildung 48: Gleichzeitigkeitsfaktoren mittels Extrapolationsverfahren auf Basis der WPM-Systems-Messdaten von Stiebel-Eltron (LW-WP) als Vorbereitung der simulativen Untersuchungen.

8.2 Simulationsbasierte Gleichzeitigkeitsfunktionen

Die nachfolgenden Gleichzeitigkeitsfunktionen stellen die finalen, für die Netzplanung nutzbaren Profile dar, die auf Basis der Erkenntnisse der messdatenbasierten Analysen und Simulationen in dieser Studie ermittelt wurden.

Für die Simulation wurden je Gebäude- und Wärmepumpentyp 244 Einzelgebäude modelliert. Das simulierte Verhalten der Wärmenachfrage wurde in 15-Minuten-Intervallen variiert. Es wurde eine Jahressimulation für den Standort München für das Wetterjahr 2012 in ¼-stündlicher Auflösung durchgeführt. Randbedingungen für die Simulation waren:

- Verschiedene Gebäudegeometrien mit unterschiedlichen Effizienzstandards je nach Baualter – fünf Baualterklassen mit jeweils fünf Sanierungszuständen, jeweils für Ein- und Zweifamilienhäuser (EZFH) und kleine Mehrfamilienhäuser (KMFH).
- Als Nichtwohngebäude (NWG) wurden Bürogebäude mit unterschiedlichen Effizienzstandards betrachtet.
- Kombinationen unterschiedlicher Nutzungsverhalten:
 - Verhältnis von 70:30 zwischen Systemen mit und ohne Nachtabsenkung
 - Nutzer- und Außentemperaturabhängiges Lüftungsverhalten
 - Stochastische Auswahl von Trinkwarmwasserprofilen und der Anzahl der Bewohner mithilfe des Profilgenerators synPro des Fraunhofer ISE [8]
- Die Dimensionierung wurde als wesentlicher Einflussfaktor identifiziert – es wurden vier unterschiedliche Bivalenzpunkte berücksichtigt (gemäß Abbildung 49)

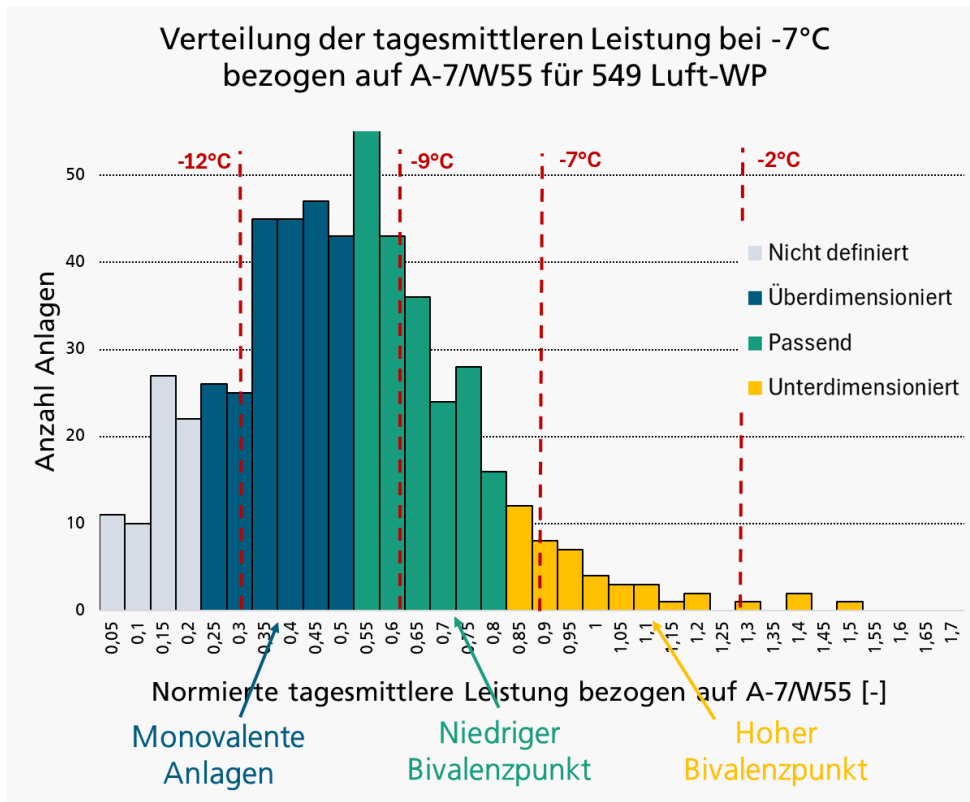


Abbildung 49: Verteilung der tagesmittleren Leistung bei einer Außentemperatur von -7°C bezogen auf den WP-Prüfpunkt A-7/W55 im Anlagenpool der Stiebel-Eltron-Wärmepumpen. Festlegung von vier diskreten Bivalenzpunkten (-2°C, -7°C, -9°C und -12°C) und deren Anteilen in den Poolsimulationen anhand der gemessenen Wärmeverbräuche.

Zur Bestimmung des Verlaufs der Gleichzeitigkeit in Abhängigkeit von der Wärmepumpenanzahl wurde das Monte-Carlo-Verfahren eingesetzt:

- a) Datenpool: ca. 700 verschiedenartige simulativ erzeugte Zeitreihen von Wärmepumpenanlagen für den Standort München
- b) Zufällige Auswahl einer festen Anzahl von Wärmepumpenanlagen aus diesem Pool (Startwert: 10 Anlagen, ohne Ausreißer) und Bestimmung der maximalen Leistung des resultierenden WP-Pools
- c) Mehrfache Wiederholung von b), um Median, Maximum, Perzentile etc. der maximalen Leistungen zu bestimmen
- d) Wiederholung von b) und c) für weitere Anlagengrößen

Randbedingung

- a) Die limitierte Anzahl an Simulationszeitreihen erlaubt nur die Bestimmung des Verlaufs der Gleichzeitigkeitsfunktion im Bereich von 10 bis etwa 150 Wärmepumpen. Aus einem Fit mittels einer Exponentialfunktion auf den Mittelwert über alle Profile ergibt sich der weitergehende Verlauf; ab etwa 400 Wärmepumpen nähern sich Mittelwert und Gleichzeitigkeitsfunktion einander an.

- b) Je geringer die Varianz der Simulationszeitreihen ist, desto ungenauer wird das Verfahren. Dies trifft in dieser Studie insbesondere auf die Betrachtung von Bürogebäuden zu.

Die Verlaufsbestimmung wurde nur für EZFH und KMFH jeweils für Luft-Wasser- und Wasser-Wasser-WP im Gebäudemix durchgeführt. Die so ermittelten Verläufe wurden für andere Grundgesamtheiten (z. B. sanierte Gebäude) übernommen und entsprechend skaliert.

In Abbildung 50 sind die Gleichzeitigkeitsfaktoren ohne Differenzierung nach Sanierungsstand sowohl für einen Extremwert (< 10 Anlagen) als auch für einen größeren Pool dargestellt. Erkennbar ist:

- Höchste Gleichzeitigkeit (1,1) bei Luft-Wasser-WP in EZFH (bezogen auf A-7/W55)
- Niedrigste Gleichzeitigkeit (0,8) bei Wasser-Wasser-WP (bezogen auf B0/W55, wodurch die Stromlast im direkten Vergleich zu Luft-Wasser-WP höher wirkt)
- Gleichzeitigkeit stark von getroffenen Annahmen zu Bivalenzpunkten abhängig
- Gleichzeitigkeit bei wenigen Anlagen sehr stark durch Heizstab dominiert
- Gleichzeitigkeit für wenige Anlagen entspricht typischem Verhältnis von Heizstab- zu Wärmepumpenleistung

Im Vergleich zu der aus den Messwerten (Extrapolation der Stiebel-Eltron-Daten auf -12 °C) abgeleiteten Gleichzeitigkeit (rechte Balken in Abbildung 50) liegt der Simulationswert für Luft-Wasser-WP in EZFH etwa 10 % niedriger.

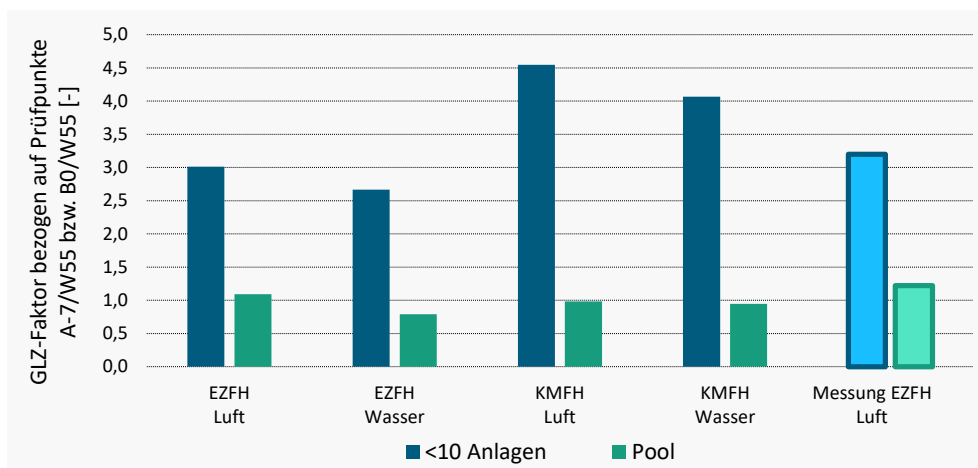


Abbildung 50: Vergleich der Gleichzeitigkeiten aus dem Simulationspool mit messtechnisch ermittelten Gleichzeitigkeiten für unflexible Wärmepumpenkollektive inkl. Heizstäbe (Gebäudemix).

Durch das Monte-Carlo-Verfahren wurden ebenfalls die GLZ-Werte für unterschiedliche Wärmepumpenanzahlen abgeleitet und entsprechende Gleichzeitigkeitsfunktionen bestimmt. In Abbildung 51 ist der Verlauf der Funktion für Luft-Wasser-WP in EZFH in Blau dargestellt. Diese liegt unterhalb der messwertbasierten Gleichzeitigkeitsfunktion (Grau), die auf Basis der Stiebel-Eltron-Daten – extrapoliert auf -12 °C – ermittelt wurde, und oberhalb der Funktionen, die für -5 °C messwertbasiert bestimmt wurden.

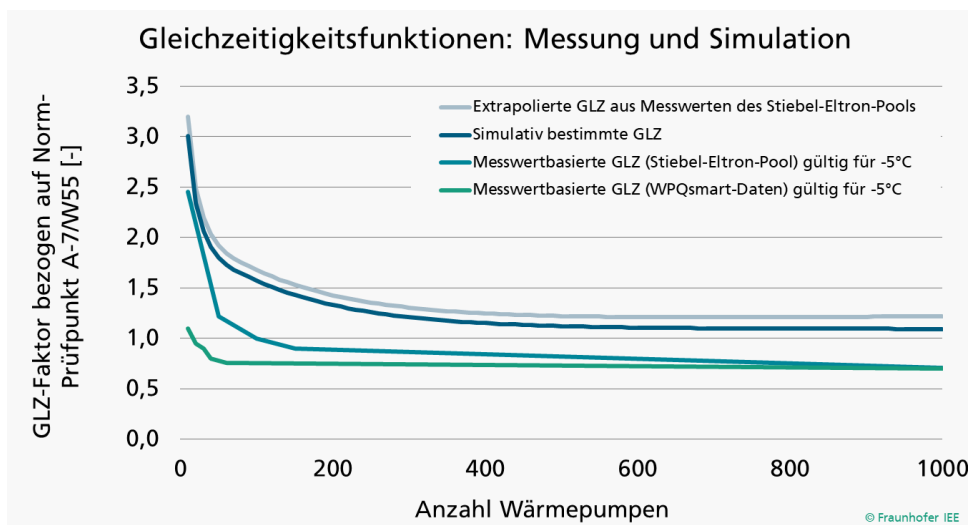


Abbildung 51: Vergleich von einer simulativ bestimmten Gleichzeitigkeitsfunktion mit verschiedenen messwertbasierten Gleichzeitigkeitsfunktionen für LW-WP in EZFH.

Wie bereits diskutiert, sind sowohl Simulationsdaten als auch Messdaten mit Unsicherheiten verbunden:

- Messungen:
 - Geringe Zahl sehr kalter Tage
 - Standorte über Deutschland verteilt
 - Nur ein Hersteller im Betriebsdatenpool und wenige Anlagen unterschiedlicher Hersteller im WPQS-Pool
- Simulationen:
 - Begrenzte Anzahl verschiedener Simulationsläufe
 - Annahmen zu Gebäudearten, Sanierungsständen, Bivalenzpunkten, Heizstäben und Nutzerverhalten

In Summe über alle Effekte zeigt sich jedoch nur ein vergleichsweise geringer Unterschied zwischen den simulativ und messtechnisch ermittelten Gleichzeitigkeitsfunktionen für LW-WP in EZFH (Vergleich »Simulativ bestimmte GLZ« und »Extrapolierte GLZ aus Messwerten des Stiebel-Eltron-Pools« in Abbildung 51).

Beim Vergleich zwischen Luft-Wasser-WP in EZFH und anderen Gebäude-Anlagen-Kombinationen zeigen sich sehr ähnliche Verläufe der GLZ-Funktionen, wie in Abbildung 52 dargestellt ist. Die GLZ-Faktoren für Wasser-Wasser-WP in KMFH liegen im Vergleich zu den Werten für EZFH deutlich höher – bezogen auf den Prüfpunkt B0/W55. Durch den Bezug auf diesen Prüfpunkt und die damit verbundene geringere normierte elektrische Leistung ist die absolute Stromlast dieser Wärmepumpen jedoch deutlich niedriger als die der Luft-Wasser-WP.

Generell hat der Heizstab bei Wasser-Wasser-WP, sofern er genutzt wird, einen höheren relativen Einfluss auf die Gleichzeitigkeit, da die Wärmepumpen selbst effizienter sind (und die elektrischen Leistungen entsprechend niedriger ausfallen). Darüber hinaus ist der Trinkwarmwasseranteil am Stromverbrauch einer Wärmepumpe im

Mehrfamilienhaus aufgrund der kompakten Gebäudebauweise und der daraus resultierenden geringeren Heizlast höher.

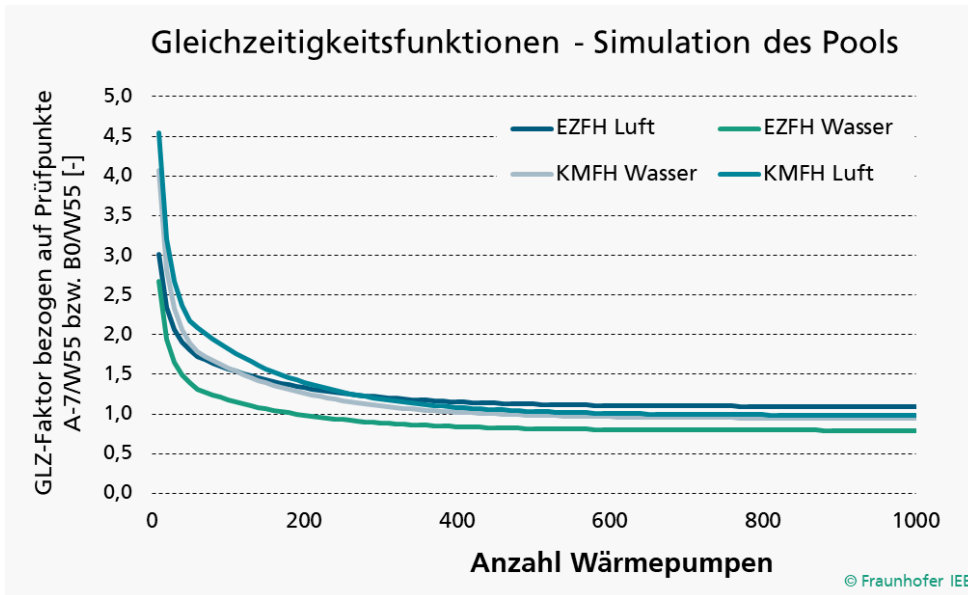


Abbildung 52: Simulationsbasierte Gleichzeitigkeitsfunktionen für verschiedene Gebäude- und Systemkonfigurationen (Pool).

Neben dem Gesamtpool wurden GLZ-Faktoren in Abhängigkeit von der Gebäudeeffizienz ermittelt und mit den Ergebnissen des Gebäudemixes verglichen – dargestellt in Abbildung 53. Aufgrund der geringen Anzahl simuliert erzeugter Profile ist jedoch keine detaillierte Auswertung der Funktionsverläufe möglich. EZFH zeigen im Konvergenzwert (Gleichzeitigkeitsfaktor für den Pool) keine bzw. nur eine sehr geringe Abhängigkeit vom Sanierungsstand. Teilsanierte Gebäude weisen tendenziell etwas höhere Gleichzeitigkeiten auf als vollsanierte Gebäude bzw. Neubauten. Bürogebäude liegen in ihrer Größenordnung nahe bei KMFH.

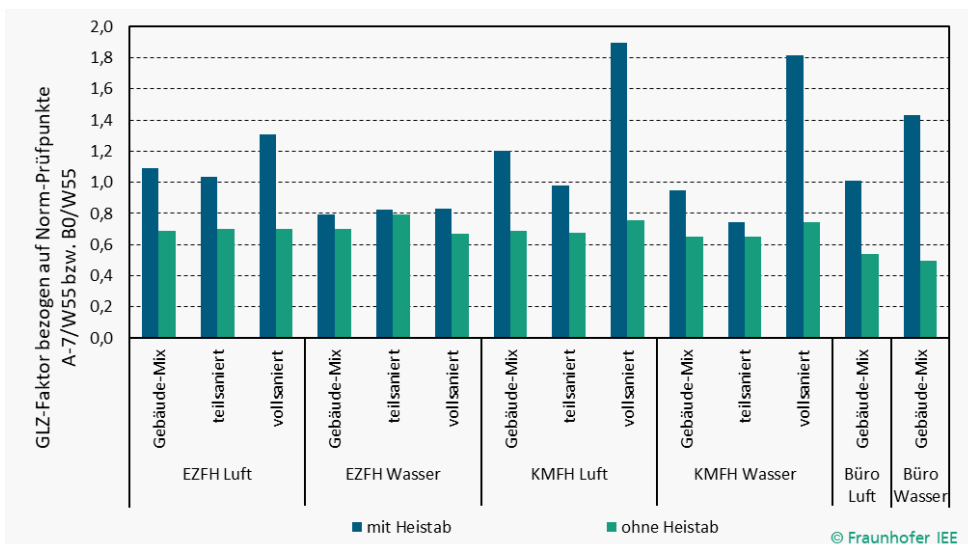


Abbildung 53: Simulationsbasierte Gleichzeitigkeitsfaktoren für verschiedene Gebäude- und Systemkonfigurationen aufgeteilt nach Gebäude- und Wärmepumpentyp sowie Sanierungsstand (Pool).

Folgendes kann zur Gleichzeitigkeit von Wärmepumpen zusammengefasst werden:

Gleichzeitigkeitsfunktionen

- Zur Bestimmung von Gleichzeitigkeitsfunktionen wurden in dieser Studie Messdaten, Simulationen sowie die Monte-Carlo-Methodik kombiniert eingesetzt.
- Die Werte simulationsbasierter Gleichzeitigkeitsfunktionen hängen stark von den getroffenen Annahmen in den Simulationsmodellen ab. Für Luft-Wasser-WP in EZFH besteht in dieser Studie jedoch eine hohe Zuverlässigkeit, da eine Validierung mit Messdaten erfolgte.
- Für einen Luft-Wasser-WP-Pool in EZFH (Anlagenzahlen über 400) wurden GLZ-Faktoren zwischen 1,2 (Messwerte) und 1,1 (Simulation) identifiziert; für wenige Anlagen können Extremwerte von etwa 3 auftreten.
- Wasser-Wasser-WP weisen – insbesondere in EZFH – geringere GLZ-Werte aufgrund des geringeren Heizstabbetriebs auf.

Unter Berücksichtigung des in Kapitel 3.2.4 beschriebenen Vorgehens zur Verwendung von Gleichzeitigkeitsfunktionen lässt sich als einfache grobe Faustformel sagen, dass bei einer thermischen Gebäudeheizlast vieler EZFH von insgesamt 10 MW eine Stromlast von maximal etwa 4 MW bei einem LW-WP-Pool bzw. von circa 2 MW bei einem WW-WP-Pool resultiert.

9.1

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 Stromsystem. Ihr flexibler Betrieb eröffnet die Möglichkeit, Lastverschiebungen zu realisieren und so sowohl das Stromnetz zu entlasten als auch auf Börsenstrompreise zu reagieren und den Verbrauch von erneuerbarem Strom zu steigern. Im Folgenden werden der aktuelle Stand der Technik, bestehende Flexibilitätsoptionen und die dafür notwendige Mindestausstattung dargestellt.

9.1.1 Potenzial und Betrieb

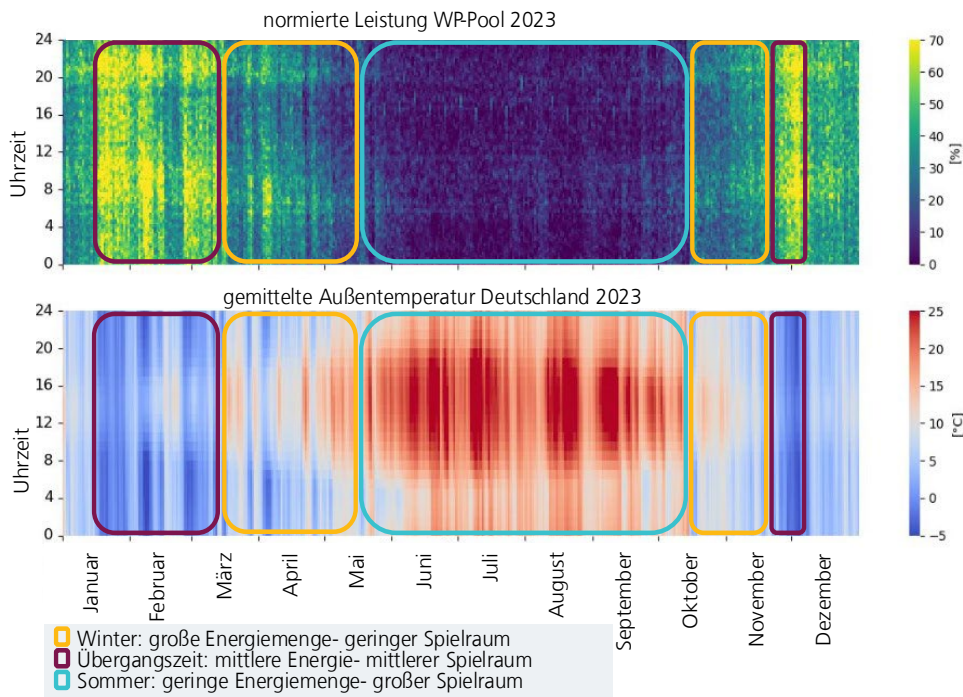
Saisonalität

Das Potenzial für die Flexibilisierung, d. h. das Lastverschiebepotenzial einer einzelnen Wärmepumpe bzw. eines gesamten Wärmepumpenpools, lässt sich vereinfacht in drei außertemperaturabhängige Cluster einteilen:

- Kalte Tage: hier besteht eine große verschiebbare Energiemenge, jedoch ein geringerer zeitlicher Spielraum.
- Warme Tage: hier stehen nur geringe Energiemengen zur Verschiebung zur Verfügung, dafür aber eine hohe zeitliche Flexibilität.
- Übergangszeit: hier sind sowohl Energiemenge als auch Flexibilität vorhanden, wenn auch jeweils nur in moderatem Umfang.

Abbildung 54 zeigt für Deutschland im Jahr 2023 den jahreszeitlichen Zusammenhang zwischen der auf die maximal gemessene Leistung normierten Wärmepumpenleistung und Außentemperatur anhand von 286 Wärmepumpenanlagen.

Im heutigen Standardbetrieb laufen viele Wärmepumpen nahezu mit ähnlichen Profilen. Insbesondere morgens, abends und bei Kälteeinbrüchen. Dies führt zu der in Abbildung 54 gezeigten tages- und jahreszeitlichen Verteilung der normierten Last und entsprechenden Lastspitzen im Stromnetz. Durch die gezielte Erschließung von Flexibilität – etwa mittels externer Steuerung oder lokalen Signalen über Preisanreize – können die Betriebszeiten der Anlagen entkoppelt und auf geeignete Zeitfenster verteilt werden. So kann die Gleichzeitigkeit des WP-Betriebs reduziert werden, was zu einer Entlastung des Netzes führt. Erste Untersuchungen mittels einer Simulationsstudie zeigten schon vor Jahren, dass sich die Gesamtlast des simulierten Pools mittags an einem kalten Tag durch Flexibilitätsererschließung um bis zu 70 % senken lässt, die betreffenden Zeiten waren jedoch mit <1h kurz [9].



Flexibler Betrieb von
Wärmepumpen

Abbildung 54: Jahreszeitliche Verteilung der gemittelten Außentemperatur und normierten Leistung des Fraunhofer ISE Wärmepumpenpools (286 Anlagen) im Jahr 2023.

Betriebsweise der Wärmepumpe

Der Betrieb von Wärmepumpen erfolgt in der Regel wärmegeführt, das heißt, die Anlagen arbeiten 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 allein erreichen kann oder die Außentemperatur unterhalb der sogenannten Bivalenztemperatur liegt, wird bei monoenergetischen Anlagen 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 dessen Auslegung. 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.

Für die Trinkwassererwärmung gilt häufig ein Vorrang gegenüber der Raumheizung. Auch in diesem Fall schaltet sich die Wärmepumpe bei Unterschreiten der Solltemperatur abzüglich der Hysterese ein und bei Erreichen der Solltemperatur zuzüglich Hysterese wieder aus. Die Temperaturmessung erfolgt dabei direkt im Speicher. Ist die Solltemperatur nicht allein durch die Wärmepumpe erreichbar, wird wie bei der Raumheizung der elektrische Heizstab aktiviert. Inverter-geregelte Wärmepumpen arbeiten im Trinkwasserbetrieb meist mit Vollast, während der Spielraum für Temperaturerhebungen vergleichsweise gering ist.

9.1.2 Flexibilitätsoptionen

Das Flexibilitätspotenzial von Wärmepumpen ergibt sich neben der Leistungsregelung und Dimensionierung 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

Batterien können unmittelbar zum Lastmanagement genutzt werden. Ende 2023 waren bereits 40 % der Aufdach PV-Anlagen mit Batterien versehen, bei den Neuinstallationen waren es 2023 fast 80 % [10]. Die Größe dieser Systeme variiert in der Regel zwischen 5 kWh und 15 kWh. Bezogen auf die elektrische Leistung einer Wärmepumpe von 3 kW entspricht das bei einem Speicher von 10 kWh einer maximalen Verschiebung unter Vollast von 3h und 20 Min.

Thermische Speicher und Solltemperaturen

Thermische Speicher bieten ein Potenzial zur Flexibilisierung des Wärmepumpenbetriebs. Wie in dieser Studie ermittelt, ist dies aber nur bis zu einer bestimmten Größe wirtschaftlich. Laut den Ergebnissen aus »WPQS im Bestand« verfügen etwa 77 % der untersuchten Wärmepumpenanlagen über einen Pufferspeicher für die Raumheizung mit einem durchschnittlichen Volumen von 279 Litern (Spanne: 16 bis 1000 Liter). Für die Bewertung von Flexibilitätseffekten in dieser Studie werden im Mittel 30 Liter/kW der thermischen WP-Leistung unterstellt.

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. Die Position des Temperatursensors im Speicher hat einen direkten Einfluss auf die tatsächlich nutzbare Speicherkapazität. Sitzt dieser sehr weit oben, ist nur dieser Bereich thermisch ladbar.

Abbildung 55 zeigt links den nutzbaren Energieinhalt in Abhängigkeit von Speichergröße und Temperaturerhöhung sowie rechts die Entladedauer bei unterschiedlichen Be- und Entladeleistungen.

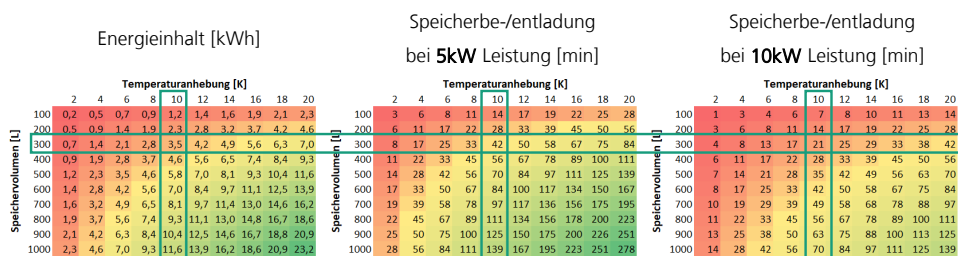


Abbildung 55: Zusammenhang zwischen Speichergröße, Temperaturerhöhung und Energieinhalt (links) sowie der Dauer der Entladung bei unterschiedlicher Be- und Entladeleistung (Mitte 5kW, rechts 10 kW). Beispiel: Bei einem 300 l Speicher und einer Temperaturerhöhung von 10 K entspricht das einem Energieinhalt 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

Auch das Gebäude selbst kann als thermischer Speicher wirken. Gut gedämmte Gebäude und Systeme mit großer Speichermasse, wie beispielsweise Fußbodenheizungen,

erhöhen das Flexibilitätspotenzial zusätzlich. Je höher die Aktivierung der Speichermasse, desto höher sind jedoch Effizienzverluste infolge unregelmäßiger Wärmeabgabe (»Überheizen«) der Räume. Dies kann durch eine modellprädiktive Regelung reduziert werden, die aber in der Praxis bisher nur in sehr kleinem Maße eingesetzt wird. Ein weiteres zusätzliches Lastverschiebepotenzial kann durch eine temporäre Abweichung von den Komfortbedingungen erreicht werden. Die Anforderungen an Raumtemperaturen sind nicht gesetzlich geregelt, es gibt jedoch einschlägige Urteile. In der Regel werden in Deutschland Heizungen auf eine Solltemperatur von 21°C eingestellt, vermietete Wohnungen sollten dauerhaft 20°C erreichen können. Das Potenzial ist jedoch erheblich. So dauert die Auskühlung eines teilsanierten Gebäudes von 20°C auf 16°C zwischen 2 und 5 Tagen, wenn der Luftwechsel auf 0,4/h beschränkt wird.

Leistungsregelung und Dimensionierung

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 können je nach Strompreinsniveau hohe Stromkosten verursachen. Ein wirksamer Hebel zur Reduktion der Gleichzeitigkeit des Strombezugs ist die zeitabhängige Begrenzung des Einsatzes der Heizstufen. Dadurch werden Teillasten in Zeiten geringerer Netzlast verlagert.

Die Mehrkosten für eine größere Auslegung, also eine Überdimensionierung der Wärmepumpe, hängen maßgeblich von der gewählten Gerätegröße und dem Hersteller ab. Im Durchschnitt muss man bei LW-Wärmepumpen mit etwa 300 bis 800 Euro Mehrkosten pro zusätzlichem Kilowatt Heizleistung rechnen. Das bedeutet beispielsweise, dass der Wechsel von einem 8 kW-Modell auf eine 12 kW-Wärmepumpe mit rund 1.600 Euro höheren Anschaffungskosten für das Gerät verbunden sein kann. Bei SW-Wärmepumpen fallen die Mehrkosten noch deutlich höher aus, da hier nicht nur das Gerät selbst, sondern auch das Quellerschließungssystem (wie Sonden oder Kollektoren) entsprechend größer dimensioniert werden muss. In geringerem Umfang gilt dies auch für die Außeneinheit einer LW-Wärmepumpe. Zusätzlich können durch eine größere Anlage auch die Wartungs- und Betriebskosten geringfügig steigen.

Eine Überdimensionierung hat auch konkrete Auswirkungen auf das Betriebsverhalten der Wärmepumpe. Einerseits verschiebt sich der sogenannte Bivalenzpunkt, also die Außentemperatur, bei der die Wärmepumpe ohne Zusatzheizung auskommt. Durch die höhere Leistung kann die überdimensionierte Wärmepumpe auch bei niedrigeren Temperaturen noch den kompletten Heizbedarf decken, sodass der elektrische oder sonstige Zusatzheizer seltener oder gar nicht mehr benötigt wird. Das ist vorteilhaft, bringt aber auf der anderen Seite Nachteile mit sich. Gerade bei milderer Außentemperaturen – also im überwiegenden Teil der Heizperiode – ist die Wärmepumpe dann deutlich leistungsstärker als eigentlich notwendig. Dadurch deckt sie den aktuellen Wärmebedarf sehr schnell ab und schaltet sich häufiger ein und aus, was als Takten bezeichnet wird. Dieses häufige Takten kann zu einem erhöhten Verschleiß des Verdichters, einer geringeren Lebensdauer und einer schlechteren Effizienz führen, da die Wärmepumpe vielfach außerhalb ihres optimalen Arbeitsbereichs betrieben wird. Bei modulierenden,

also leistungsgeregelten (Inverter-)Wärmepumpen ist die Taktrate zwar geringer, doch auch hier kann eine deutliche Überdimensionierung dazu führen, dass die Mindestleistung der Anlage nicht gut an den tatsächlichen Bedarf angepasst werden kann, was ebenfalls die Effizienz mindert. Aktuelle Entwicklungen adressieren dieses Thema. Insgesamt ist eine übergroße Wärmepumpe also mit höheren Investitionskosten verbunden, verschiebt zwar den Bivalenzpunkt zugunsten eines geringeren Einsatzes von Zusatzheizungen, führt aber zu einem ungünstigen Taktverhalten und damit zu Einbußen bei Lebensdauer und Effizienz. Daher sollte die Auslegung der Wärmepumpe immer sorgfältig zwischen Kosten, Effizienz, gewünschter Flexibilität und Lebensdauer abgewogen werden.

Ältere Wärmepumpen-Bestandsanlagen arbeiten im sogenannten Taktbetrieb. Sie schalten sich ein und aus, um den aktuellen Wärmebedarf zu decken. Moderne Geräte verfügen zunehmend über modulierende Verdichtertechnik, die eine stufenlose Anpassung der Leistung und damit einen flexibleren Betrieb ermöglicht. Die Steuerung erfolgt typischerweise über eine interne Regelung, die sich am Heiz- und Warmwasserbedarf sowie der Außentemperatur orientiert. Seit 2000 gab es einen starken Wandel. Während modulierende Wärmepumpen vor 2010 fast keine Rolle spielten, sind sie heute (2024) mit über 95 % Marktanteil bei Neugeräten Standard. Der absolute Anteil im Bestand wächst durch Austausch und Nachrüstung, ist aber durch die lange Lebensdauer der Geräte noch niedriger.

Hybridsysteme

Als zusätzliche Flexibilitätsoption können auch weitere, nicht strombasierte Wärmeerzeuger – wie Gas-, Öl- oder Pelletkessel – eingesetzt werden. Diese dienen meist als Backup-Lösung. Diese als Hybridlösungen bezeichneten Technologien können je nach Auslegung einen erheblichen Anteil der Last übernehmen, bedürfen aber immer eine Dopplung entweder der Netzinfrastruktur oder Lagerung. Insbesondere für den Einsatz in Bestandsgebäuden sind inzwischen unterschiedliche Systeme auf dem Markt verfügbar; deren Marktanteil ist jedoch bisher gering. Erfolgt der Aufbau eines solchen Systems durch die Ergänzung eines Bestandskessels ist auf eine korrekte hydraulische und regelungstechnische Einbindung des Bestandgerätes zu achten, was mit erhöhten Planungs- und Installationskosten einhergeht. Werden bei den Hybridlösungen fossile Brennstoffe eingesetzt, so ist deren Betrieb nicht nachhaltig kompatibel mit Klimaschutzziele.

Regelung, Steuerung und Kommunikation

Für die Erschließung von Flexibilität muss die Wärmepumpe extern steuerbar oder regelbar sein. 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 Inverter geregelter Verdichter. 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 Erschließung von Flexibilität. Für die Umsetzung externer Steuersignale ist ein Steuergerät oder ein Energiemanagementsystem (EMS) erforderlich, dass die Signale empfängt und an die Wärmepumpe weitergibt. Ein EMS kann zudem weitere flexible Verbraucher im Haus einbinden.

Am weitesten verbreitet für die unidirektionale Ansteuerung ist das SG-Ready Label. Das SG-Ready-Label ist ein von der Heizungsindustrie entwickelter Standard, der eine Schnittstelle für die externe Ansteuerung von Wärmepumpen definiert. Diese basiert auf zwei Relaiskontakten, die vier verschiedene Betriebszustände (Aus, Normalbetrieb, empfohlener Betrieb, Zwangsbetrieb) an die Wärmepumpe übermitteln. Je nach Signal

erhöht die WP beispielsweise die Speichertemperatur, priorisiert Warmwasser oder wird abgeschaltet. Das SG-Ready-Label ermöglicht so eine grundlegende Lastverschiebung und ist einfach umsetzbar. Allerdings reagieren verschiedene Herstelleranlagen unterschiedlich auf die Signale, und es fehlt bislang an einer einheitlichen Zertifizierung und Rückmeldemöglichkeiten des tatsächlichen Betriebs zum Netzbetreiber. Es werden zudem nur Kombinationen von Schaltkontakten (an/aus) übertragen – keine stufenlosen oder prozentualen Werte. Die Wärmepumpe reagiert auf diese Signale nach werkseitig festgelegten Einstellungen (z.B. Temperaturerhöhung, Freigabe/Blockade, Vorrang Warmwasser), aber eine direkte Vorgabe eines Leistungswertes (z.B. »Fahre auf 65 % deiner Maximalleistung«) ist nicht möglich.

Mit der Einführung von SG Ready Version 3 zum 1.5.2025 wurde der Standard weiterentwickelt. Nun sind die Labelvergabe und die technische Schnittstellenbeschreibung getrennt geregelt, um flexibler auf neue Anforderungen (z. B. §14a EnWG) reagieren zu können. Die neuen Schnittstellen ermöglichen perspektivisch eine präzisere, teilweise auch bidirektionale Steuerung der Wärmepumpe, was die Integration in das Smart Grid verbessert und die Nutzung erneuerbarer Energien sowie die Netzstabilität fördert. Zudem wird eine EVU-Sperre unterstützt, mit der Netzbetreiber Wärmepumpen bei Bedarf kurzzeitig abschalten können. Mit der Einführung von SG-Ready Version 3.0 wurde zwar die Grundlage geschaffen, um zukünftig auch flexiblere Kommunikationsformen einzubinden, jedoch bleibt die klassische, im Markt etablierte relaisbasierte SG-Ready-Schnittstelle weiterhin auf die vier festen Betriebszustände beschränkt.

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 Optimierung der PV-Eigenstromversorgung genutzt. Dabei arbeiten die meisten HEMS mit dem Ziel einer wirtschaftlichen Optimierung.

9.2

Bewertung der Flexibilisierung von Wärmepumpen

9.2.1 Prämissen

Bei der Bewertung von Flexibilitätsoptionen ist das Strompreissignal eine zentrale Randbedingung, da es die ökonomischen Anreize maßgeblich bestimmt. Im Rahmen der Studie wurden folgende Prämissen festgelegt:

- IEE-Strommarktmodell SCOPE-EM für zukünftige Spotmarktpreise in Deutschland:
 - Preisbildung am europäischen Strommarkt 2033 und 2045 anhand historischem Wetterjahr 2012, einschließlich hoher Durchdringung mit Wind- und Solarstrom sowie Flexibilitäten (z.B. Elektrolyseure, Power-to-Heat, Batteriespeicher)
 - Erhöhung des Preisniveaus in Zeiten von Dunkelflauten durch einen kombinierten Kapazitätsmarkt (Bilanzkreisverantwortung); Annahme, dass Fixkosten neuer Kraftwerke verursachergerecht stündlich anfallen und nicht über Netzentgelte pauschal über das gesamte Jahr verteilt werden

- Varianten zu weiteren SESB (sonstigen energiebezogenen Strompreisbestandteilen – statische Netzentgelte, Steuern, Abgaben, Umlagen), aus denen sich die Endverbraucherpreise ergeben:
 - 2033: niedrige SESB (Spotpreis + 2 ct/kWh)*1,19 % MwSt. (Verringerung von Verzerrungen zur effizienten Flexibilitäterschließung durch Reduktion fixer Strompreisbestandteile, z. B. Stromsteuerreduktion, Dynamisierung von Netzentgelten, Wegfall von Umlagen)
 - 2045:
 - (1) hohe SESB (Spotpreis + 20 ct/kWh)*1,19 % MwSt. (heutige Systematik)
 - (2) niedrige SESB (Spotpreis + 1 ct/kWh)*1,19 % MwSt.

Grundsätzlich ist anzumerken, dass die in dieser Studie unterstellten Spotmarktzeitreihen die Volatilität zukünftiger Preise vermutlich unterschätzen. Dies begründet sich wie folgt:

- Es wird tendenziell eine Marktsättigung mit Flexibilitäten aus Kurzfristspeichern (z. B. Batterien, Vehicle-to-Grid, PV-Speicher) angenommen. Dies führt zu Phasen mit quasi konstanten Day-Ahead-Preisen („Plateaus“) über mehrere Tage.
- Das Strommarktmodell unterschätzt aufgrund der aggregierten Simulation die Heterogenität individueller Grenzkosten flexibler Anlagen.
- Weitere Einnahmequellen werden nicht berücksichtigt:
 - Intraday- und Regelleistungsmärkte: Obwohl eine Marktsättigung wahrscheinlich ist und Preisdifferenzen dadurch tendenziell an das Day-Ahead-Niveau heranrücken, bleiben zusätzliche Erlöse möglich
 - Lokale Signale zur Netzengpassbehebung, z. B. marktbasierter Redispatch, dynamische Netzentgelte oder eine mögliche Aufteilung Deutschlands in Strompreiszonen.
 - Weitere Systemdienstleistungen neben der Regelleistung

Auch wenn es eine modellbedingte Unterschätzung der Marktanreize bzw. Erlösmöglichkeiten gibt, steht dem eine modellbedingte Überschätzung der individuellen Optimierungsmöglichkeiten der Wärmepumpen gegenüber (z. B. durch Annahme einer perfekten Voraussicht von Wärmebedarf, Temperaturen, Strompreisen etc.).

In Abbildung 56 ist die Wirkung der Kapazitätspreisaufschläge für zehn Tage während der kalten Dunkelflaute dargestellt. Es wird deutlich, dass die Kapazitätspreise zu einem ausgeprägten Tag-/Nacht-Preisunterschied in diesen Zeiten führen.

Die Preiszeitreihen der in dieser Studie unterstellten Endverbraucherpreise sind in Abbildung 57 und Abbildung 58 sowohl als Jahresdauerlinie als auch als chronologische Zeitreihe dargestellt.

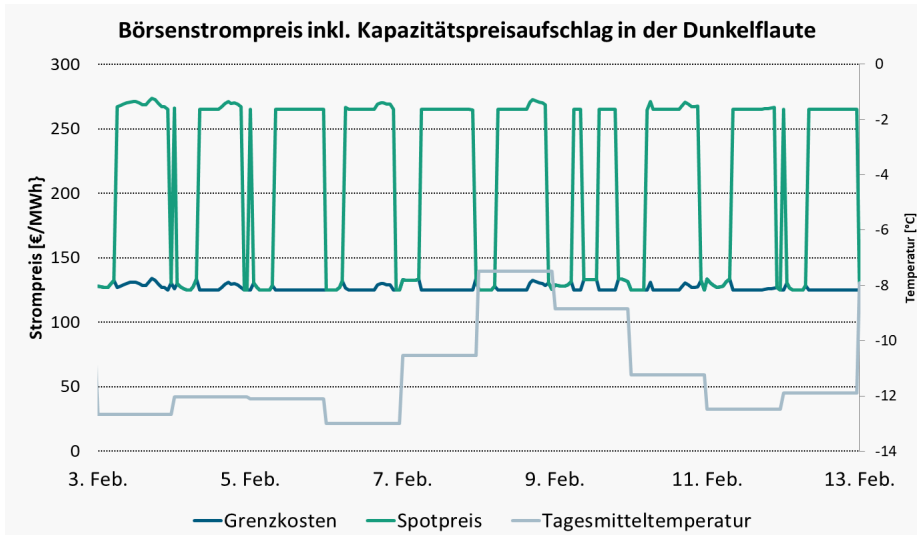


Abbildung 56: Strommarktpreise – Spotpreise inkl. Berücksichtigung des Kapazitätsmarktes.

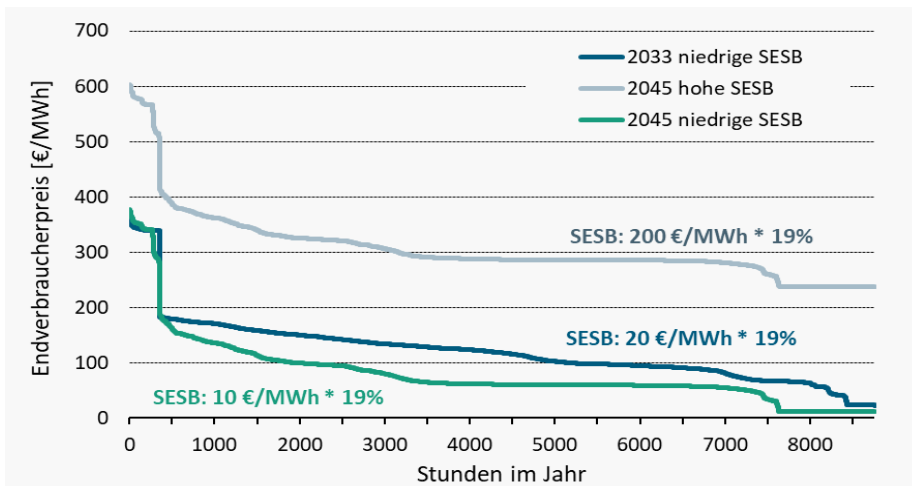


Abbildung 57: Jahresdauerlinie des Endverbraucherpreises für verschiedene SESB-Varianten.

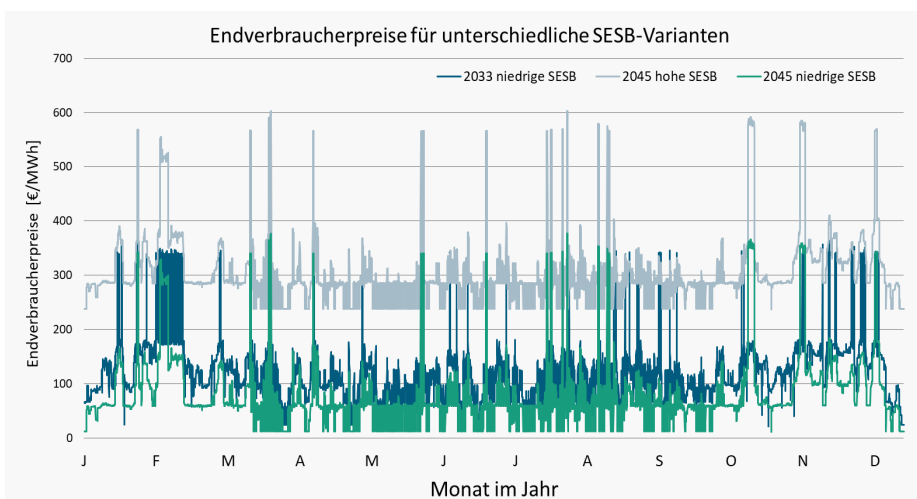


Abbildung 58: Jährliches Endverbraucherpreisprofil anhand von ¼-Stunden-Werten für verschiedene SESB-Varianten.

Das Stromverteilnetz weist typischerweise nur in einer relativ geringen Zahl von Stunden Engpässe auf, die zu Engpassmanagementkosten und ggf. zu einem Netzausbaubedarf führen. Dynamische Netzentgelte können hierbei als lokale Preissignale wirksam werden, um strommarktbedingte Gleichzeitigkeiten zu vermindern oder – im Vergleich zu einem unflexiblen Wärmepumpenbetrieb – die Netzlast weiter zu reduzieren.

Abbildung 59 zeigt simulierte Netzlastdaten auf Basis des historischen Wetterjahres 2012 im Rahmen eines Netzausbauplans (NAP) aus dem Jahr 2024 für ein beispielhaftes Verteilnetz in einem Szenario mit Klimaneutralität im Jahr 2045. Die Netzlast bezieht sich dabei sowohl auf eine Ortsnetzstation (ONS) als auch auf ein Umspannwerk (UW) – jeweils mit hohen Anteilen von Wärmepumpen (für die ein unflexibler Betrieb angesetzt wurde) sowie weiteren neu hinzukommenden Verbrauchern wie E-Kfz.

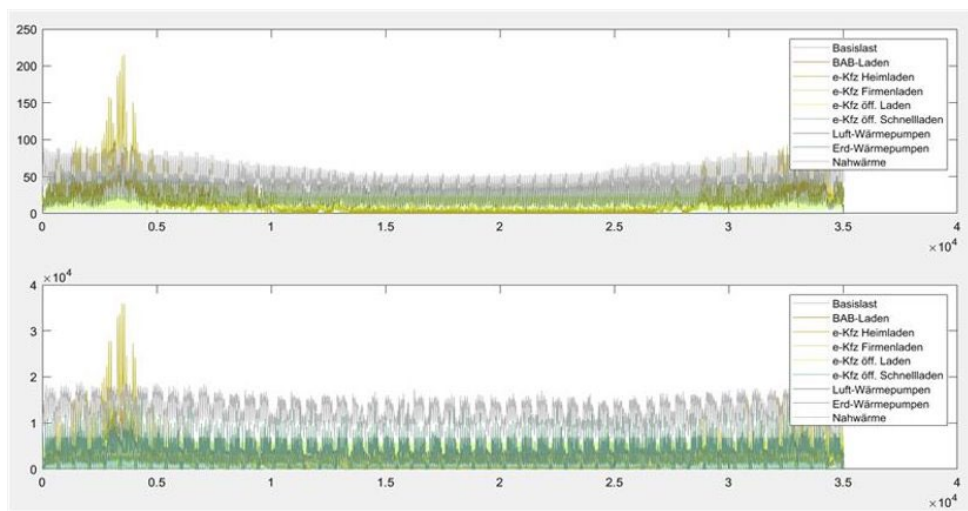


Abbildung 59: Beispieldaten eines NAP: 1 Ortsnetzstation (ONS) und ein Umspannwerk (UW) gemäß einem Szenario mit Klimaneutralität im Jahr 2045.

Es wurde in dieser Studie vereinfacht unterstellt, dass bei einer Netzlast von mehr als zwei Dritteln der Höchstlast ein ineffizienter Netzausbaubedarf resultieren würde, der durch eine Flexibilitätserschließung vermieden werden könnte. In Summe betrifft dies wie in Abbildung 60 dargestellt bei den beispielhaften Netzlastdaten 2,7 Tage an der ONS und 3,4 Tage am UW. Kombiniert tritt dieser Fall, ermittelt über die Jahresdauerlinien in Abbildung 61, an 4,3 Tagen pro Jahr auf (Viertelstunden mit mehr als zwei Dritteln der Höchstlast entweder an der ONS oder am UW). Der längste durchgehende Höchstlastzeitraum beträgt etwa 1,5 Tage.

In dieser Studie wird exemplarisch simuliert, welche Lastreduktion von Wärmepumpen über einen Zeitraum von 1,5 Tagen möglich ist – unter der Annahme, dass kürzere Zeitfenster eine geringere Herausforderung darstellen und das Lastreduktionspotenzial daher voraussichtlich mindestens auf dem Niveau dieses Worst-Case-Zeitraums liegt. In der Simulation wird eine Netzrestriktion durch auslastungsabhängige, dynamische Netzentgelte (temporärer Leistungspreis) ausschließlich im Worst-Case-Zeitraum (vom 6. Februar, 5:00 Uhr, bis zum 7. Februar, 15:30 Uhr, rund 1,5 Tage) berücksichtigt. Als Leistungspreis wurden 20 €/kW angesetzt, was im Vergleich zum Marktpreis ein dominierendes Preisniveau widerspiegelt.

Andere überlastete Zeitpunkte werden zur Vereinfachung der Simulation nicht berücksichtigt. Zusätzliche Höchstlastzeiträume, die sich aus marktbedingt steigenden Gleichzeitigkeiten durch die Reaktion auf dynamische Tarife ergeben könnten, werden ebenfalls nicht einbezogen.

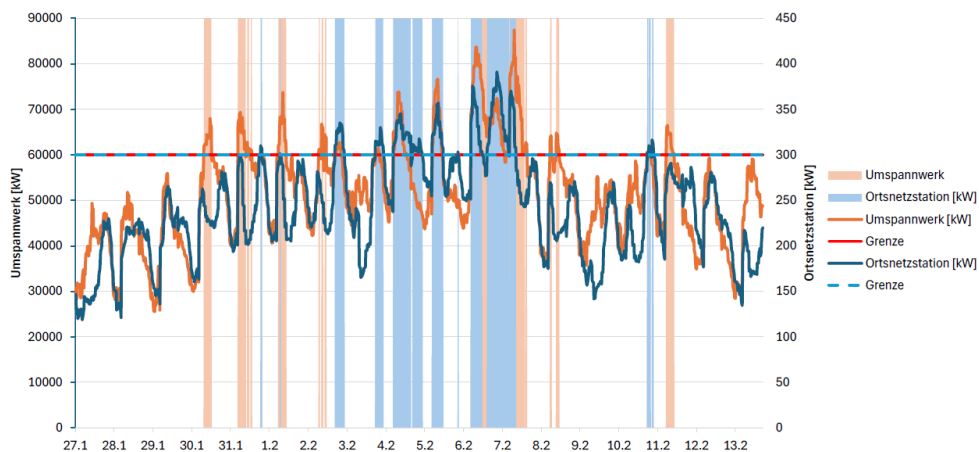


Abbildung 60: Gleichzeitig auftretende Höchstlastzeiten an einem Umspannwerk und einer unterlagerten Ortsnetzstation in einem beispielhaften Verteilnetz-Netzausbauplan im Szenario mit Klimaneutralität im Jahr 2045.

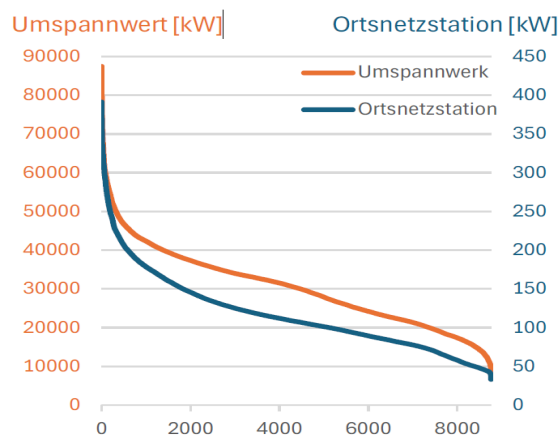


Abbildung 61: Jahresdauerlinie der Netzlast an einem Umspannwerk und einer Ortsnetzstation in einem beispielhaften Verteilnetz-Netzausbauplan im Szenario mit Klimaneutralität im Jahr 2045.

9.2.2 Flexibles Betriebsverhalten von Wärmepumpen

Der flexible Betrieb von Wärmepumpen kann sowohl die Effizienz als auch die Wirtschaftlichkeit maßgeblich beeinflussen. Gegenüber dem unflexiblen Betrieb bestehen folgende Freiheitsgrade:

- Direktbetrieb der Wärmepumpe im Bypass (ohne Nutzung des Speichers) – effizienterer COP entsprechend der Vorlauftemperatur & Vermeidung von Speicherverlusten
- Betrieb der Wärmepumpe zur minimalen Überhitzung des Speichers (z.B. 60 °C) – ineffizienterer COP, der jedoch in Abhängigkeit vom Strompreis trotzdem zu geringeren Kosten führen kann & höheres Speicherpotenzial
- Betrieb des Heizstabs zur starken Überhitzung des Speichers (z.B. 80 °C) – deutlich geringere Effizienz, aber gegebenenfalls geringere Kosten in Niedrigpreisphasen & maximales Speicherpotenzial

Die in dieser Studie unterstellte Optimierung umfasst eine rollierende Planung mit einem 3-Tage-Prognosehorizont, wobei jeweils der erste Tag fixiert wird und die folgenden Tage unter Einbezug aktualisierter Markt- und Anlageninformationen reoptimiert werden. Es erfolgt eine Optimierung zur Reduktion der Stromkosten (Börsenstrompreis als dynamischer Stromtarif inkl. sonstiger energiebezogener Strompreisbestandteile). Folgende Faktoren werden dabei für jeden Zeitpunkt bewertet:

- Höhere Außentemperaturen am Nachmittag zur Verbesserung des COP
- Speicherverluste
- Niedrige Strompreise ausnutzen und hohe vermeiden (einschließlich dynamischer Netzentgelte im Worst-Case-Zeitraum vom 6. Februar, 5:00 Uhr, bis zum 7. Februar, 15:30 Uhr, rund 1½ Tage)

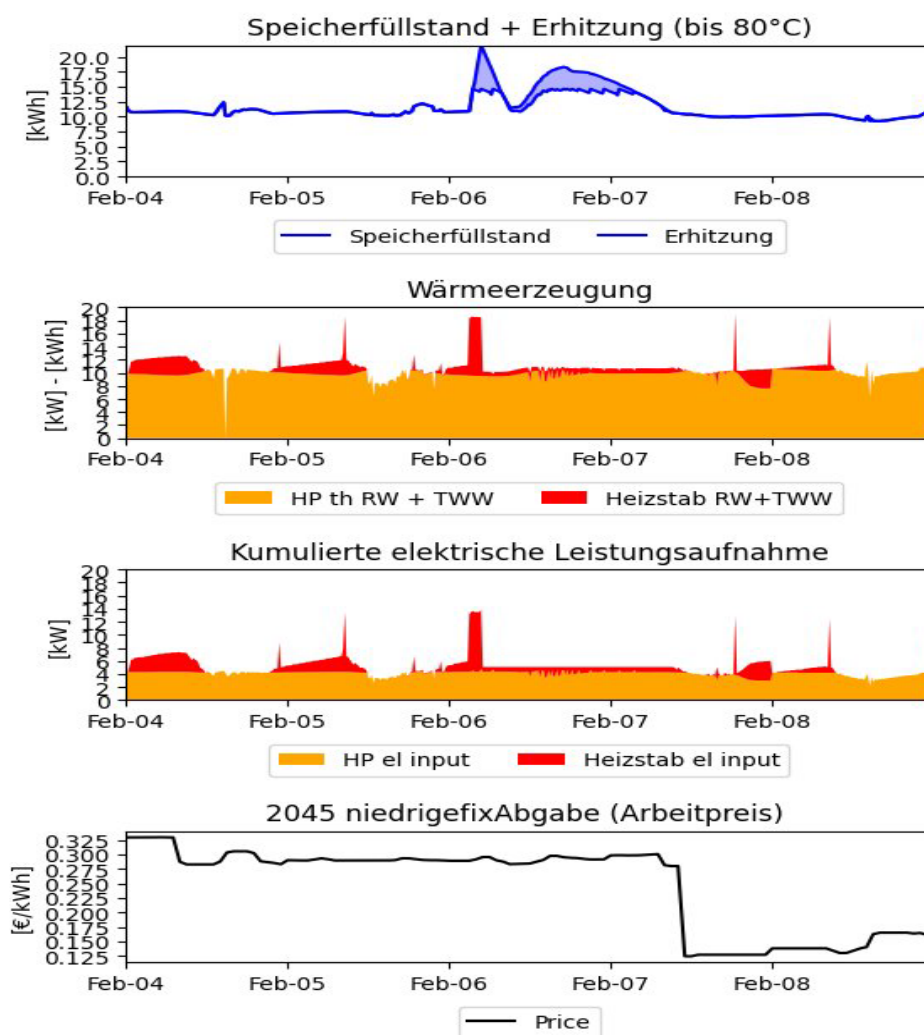


Abbildung 62: Flexibler Betrieb anhand eines Beispielgebäudes (EZFH, Bivalenzpunkt -7 °C, 55 °C Vorlauftemperatur, ohne Nachtabsenkung; Preise im unteren Diagramm mit niedrigen SESB, ohne dynamische Netzentgelte).

Abbildung 62 veranschaulicht, wie sich der flexible Betrieb sowohl vor Beginn des dynamischen Netzentgelts (Beladung des Speichers ohne Leistungsbegrenzung) als auch während der Nacht unter Anwendung dynamischer Netzentgelte auswirkt. In der Nacht ist die Heizlast gering, sodass der Speicher gezielt vor der morgendlichen Lastspitze

geladen werden kann, wodurch die Maximalleistung im relevanten Zeitraum reduziert wird.

Folgende Varianten wurden für die Vielzahl individueller Einzelgebäude (EFZH sowie KMFH) mit Luft-Wasser-WP simuliert (siehe auch Tabelle 5):

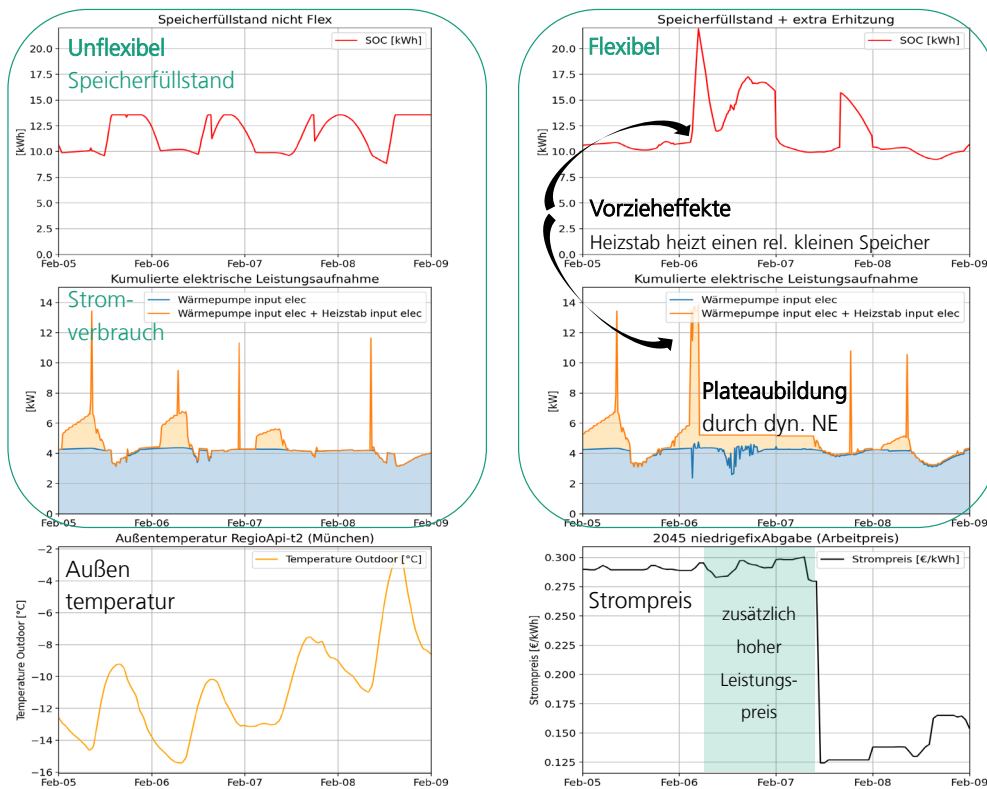
- Endverbraucherpreis: In allen Fällen wird dieser in der Simulation mit demselben dynamischen Netzentgelt über 1½ Tage (6. Februar, 5:00 Uhr, bis 7. Februar, 15:30 Uhr) kombiniert. Die Kosten aus dem dynamischen Netzentgelt werden bei der Auswertung der Strombezugskosten nachträglich wieder herausgerechnet.
 - 2033 + niedrige SESB (sonstige energiebezogene Strompreisbestandteile exkl. dynamisches Netzentgelt)
 - 2045 + hohe SESB
 - 2045 + niedrige SESB
- Flexibilitätsoptionen
 - Standard: gleiche Dimensionierung wie bei unflexiblen Wärmepumpen (z. B. Heizungspufferspeicher mit 30 Litern/kW Wärmepumpenleistung)
 - Doppelt so großer Heizungspufferspeicher
 - Doppelt so großer Heizungspufferspeicher + Komfortabsenkung (von 21 °C auf 19 °C) an sehr kalten Tagen mit hohen Strompreisen
 - Batterie (mit 10 kWh Kapazität) – Einsatz nur zur Reduktion der Stromkosten der Wärmepumpe (ohne Berücksichtigung von Arbitrage an den Strommärkten oder PV-Eigenversorgung)

Szenario	Fixer Strompreis		Bezugsjahr 2033 + niedrige SESB		Bezugsjahr 2045 + niedrige SESB			Bezugsjahr 2045 + hohe SESB
	EFZH	KMFH	EFZH	EFZH	EFZH	KMFH	EFZH	EFZH
Betriebsweise	Unflexibel				Flexibel			Flexibel
Systemdimensionierung	Standard	Standard	Standard	Größerer Speicher	Größerer Speicher + Komfort-Absenkung	Standard + Batterie	Standard	
Gebäude (Gebäude-Mix, LW-WP)	EFZH	KMFH	EFZH	EFZH	KMFH	EFZH	EFZH	EFZH

Tabelle 5: Übersicht der betrachteten Varianten

Die Wechselwirkungen sind für ein Beispielgebäude im Winter in Abbildung 63 dargestellt. Es zeigt sich eine begrenzte Flexibilität in Zeiten mit hohem Verbrauch und damit hohen Kosten, sowie eine deutliche Reduktion des Heizstabeinsatzes in Zeiten des dynamischen Netzentgelts. Der Speicher ist im Verhältnis zur thermischen Last im Betrachtungszeitraum relativ klein, erweist sich jedoch als nützlich für den Ausgleich zwischen Tag und Nacht. Zu erkennen ist ein erhöhter Heizstabeinsatz der flexiblen Wärmepumpe vor Eintritt der Wirksamkeit des Netzentgelts (Vorzieheffekt).

Ein dynamischer Arbeitspreis, der mögliche Vorzieheffekte berücksichtigt, wäre voraussichtlich besser geeignet als der hier unterstellte zeitweise erhobene Leistungspreis, um Netzlastspitzen nachhaltig zu vermeiden.



Flexibler Betrieb von Wärmepumpen

Abbildung 63: Gegenüberstellung des Betriebsverhaltens einer flexiblen und einer unflexiblen Wärmepumpe anhand eines Beispielgebäudes im Winter (Baujahr 1978, Bivalenzpunkt $-7\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Abbildung 64 macht für das Kollektiv aller simulierten Luft-Wasser-WP in EZFH die netzentlastende Wirkung des dynamischen Netzentgelts sichtbar. Begründet ist diese Wirkung durch das Ausnutzen mehrerer Freiheitsgrade. Im Kollektiv ist insbesondere die Flexibilität der überdimensionierten Wärmepumpen entscheidend, die auch ohne Heizstab die Wärmelast decken können und mittels des Wärmespeichers Spitzenlasten reduzieren. Das Kollektiv erreicht durch die Berücksichtigung des dynamischen Netzentgelts generell einen geringeren Stromverbrauch, bedingt durch eine höhere Effizienz (z. B. Vermeidung der Speichernutzung bzw. Minimierung von Speicherverlusten durch punktuellen Betrieb und kontrolliertes Auskühlen außerhalb der Nutzungszeiten). Des Weiteren können auch unterdimensionierte Wärmepumpen den Heizstabbetrieb zumindest für kurze Zeit reduzieren.

Aus Abbildung 64 wird zudem ersichtlich, dass durch dynamische Netzentgelte auch neue Leistungspeaks auftreten können. Im gezeigten Beispiel tritt ein solcher Peak unmittelbar vor Beginn des zeitweisen Leistungspreises auf. Die Leistungssteigerung fällt im Vergleich zur Reaktion auf Strompreissignale stark aus. Dies müsste durch eine geeignete Ausgestaltung des dynamischen Netzentgelts (z. B. ansteigender dynamischer Arbeitspreis statt zeitweiser Leistungspreis) adressiert werden.

Für die Bewertung des Einflusses des flexiblen Betriebs auf die Gleichzeitigkeit von Wärmepumpen – dargestellt in Abschnitt 9.2.3 – wurden die Vorzieheffekte durch das dynamische Netzentgelt nicht berücksichtigt, da diese voraussichtlich durch eine geeignete Preisgestaltung vermieden oder zumindest stark reduziert werden können.

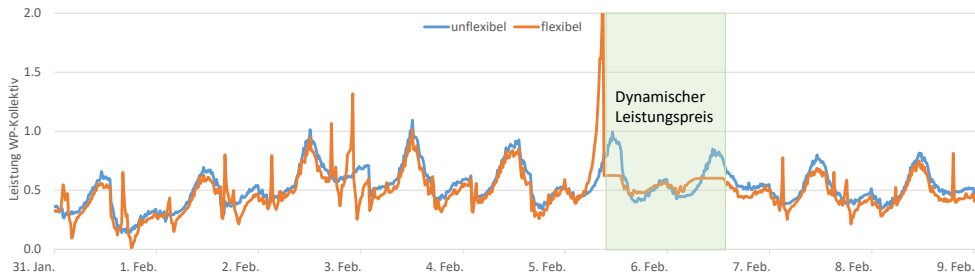


Abbildung 64: Gegenüberstellung der gleichzeitigen Leistungsaufnahme eines flexiblen und eines unflexiblen Wärmepumpenkollektivs.

Am höchsten ist die strommarktseitige Flexibilität in den Übergangszeiten im Frühjahr und Herbst, da ein moderater Verbrauch mit einer ausreichenden Verschiebeleistung zusammentrifft. Für das bereits zuvor erwähnte Beispielgebäude ist dies für eine Frühlingswoche in Abbildung 65 dargestellt. Neben der flexibleren Betriebsweise der Wärmepumpe und der intensiveren Speichernutzung wird auch das häufigere Takten deutlich, was zu einem höheren technischen Verschleiß führen kann.

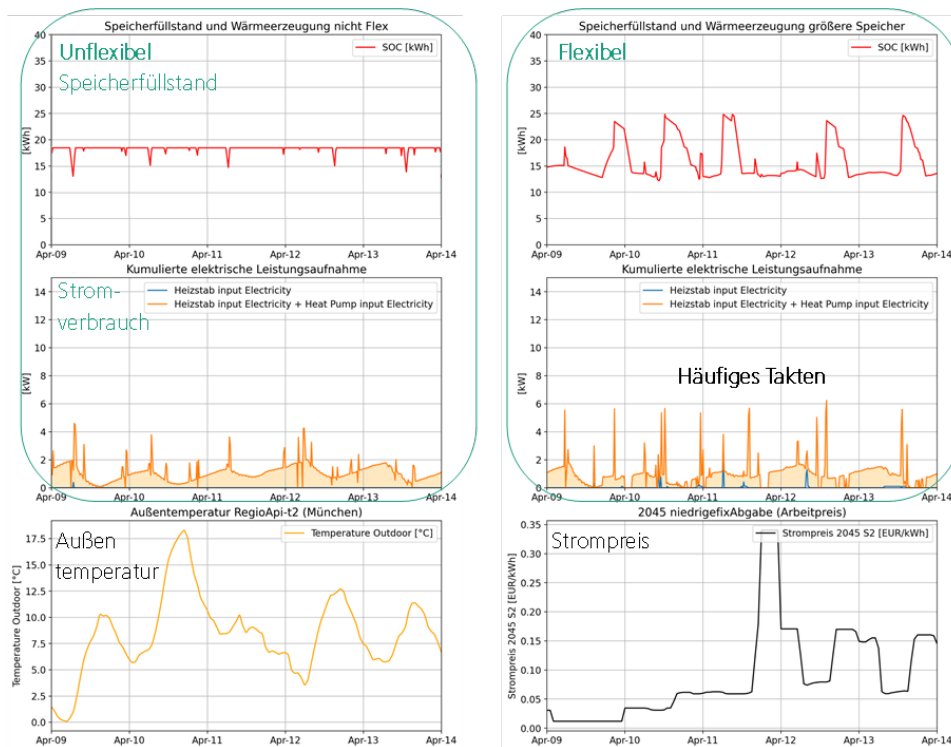


Abbildung 65: Gegenüberstellung des Betriebsverhaltens einer flexiblen und einer unflexiblen Wärmepumpe für ein Beispielgebäude im Frühjahr (Baujahr 1978, Bivalenzpunkt -7 °C).

9.2.3 Einfluss des flexiblen Betriebs auf die Gleichzeitigkeit von Wärmepumpen

Abbildung 66 zeigt die Gleichzeitigkeitsfaktoren für einen Pool von Luft-Wasser-Wärmepumpen in EZFH für alle betrachteten Varianten flexibler Wärmepumpen (grün) im Jahr 2045 mit niedrigen sonstigen energiebezogenen Strompreisbestandteilen (SES) im Vergleich zu unflexiblen Wärmepumpen (blau).

Ein Sonderfall stellt der Einsatz von Batterien dar (hellgrün). Die saisonal unabhängige Flexibilität einer Batterie führt zu hohen Leistungsspitzen beim Strombezug bzw. bei der Einspeicherung, um dann in der Ausspeicherung mit geringer Leistung den

Stromverbrauch der Wärmepumpe zu decken. Dies reduziert jedoch selbst in Zeiten dynamischer Netzentgelte Leistungsspitzen nur geringfügig, da der Stromverbrauch der Wärmepumpe deutlich höher ist als die Batteriekapazität.

Durch eine größere Flexibilität (z. B. größere thermische Speicher) erhöht sich bei einer Optimierung nach Börsenstrompreisen die Gleichzeitigkeit und damit die Netzbelastung weiter. Demgegenüber sind bei größerer Flexibilität kaum zusätzliche Netzentlastungseffekte in Zeiten dynamischer Netzentgelte zu beobachten. Auch eine zusätzliche Absenkung der Raumtemperatur in der kalten Dunkelflaute hat aufgrund der extremen Außentemperaturen nur einen sehr geringen netzentlastenden Effekt.

Nicht dargestellt sind die Effekte für wenige Anlagen. Bei diesen dürfte sich der flexible Betrieb nach marktlichen Preisanreizen – insbesondere in Kombination mit niedrigen fixen Strompreisbestandteilen – noch stärker erhöhend auf die Gleichzeitigkeit auswirken.

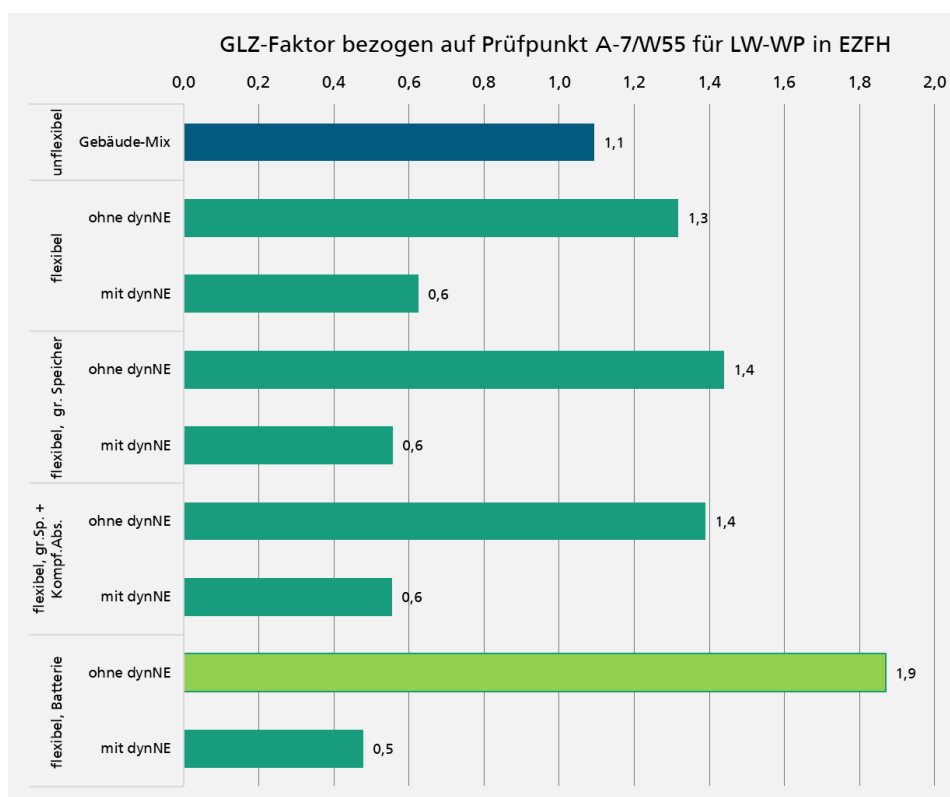


Abbildung 66: Gleichzeitigkeitsfaktoren für einen Pool von Luft-Wasser-Wärmepumpen in EZFH für verschiedene Varianten flexibler Wärmepumpen im Jahr 2045 mit niedrigen SESB im Vergleich zu unflexiblen Wärmepumpen (dynNE: dynamisches Netzentgelt).

Durch die Simulation flexibler Luft-Wasser-WP in EZFH ist ein deutlicher Einfluss der marktlichen Optimierung auf die Gleichzeitigkeit sichtbar. Die marktliche Flexibilitätserweiterung verursacht eine signifikante Steigerung der Gleichzeitigkeit gegenüber unflexiblen Wärmepumpen. Dies impliziert Netzüberlastungen, wenn das Netz auf einen unflexiblen Betrieb der Wärmepumpen dimensioniert wird. In diesem Fall müssten Maßnahmen (z.B. dynamische Netzentgelte oder Hüllkurven) ergriffen werden, um Leistungsspitzen zu vermeiden.

Die Steigerung des GLZ-Faktors von 1,1 auf 1,4 durch marktliche Flexibilitätserweiterung könnte dabei zukünftig theoretisch etwas geringer ausfallen, bedingt durch die Rückkopplung des flexiblen Betriebs auf den Strommarktpreis. Im aktuellen Markt

werden bei dynamischen Stromtarifen die Spotmarktpreissignale direkt an Kunden weitergegeben (hier angewendeter Ansatz im Simulationsmodell).

Für die Zeitpunkte mit dynamischem Netzentgelt zeigt sich ein Potenzial für eine Halbierung der Netzbelastung über den gesamten Anlagenpool – insbesondere durch den optimierten Einsatz der Flexibilität überdimensionierter Wärmepumpen, durch geringere Speicherverluste und höhere COPs sowie eine Vermeidung bzw. Reduktion des Heizstabbetriebs.

In Abbildung 67 ist zusätzlich der Effekt einer flexiblen Betriebsweise von Wärmepumpen in KMFH dargelegt. Hier zeigt sich eine geringere Auswirkung auf die Gleichzeitigkeit.

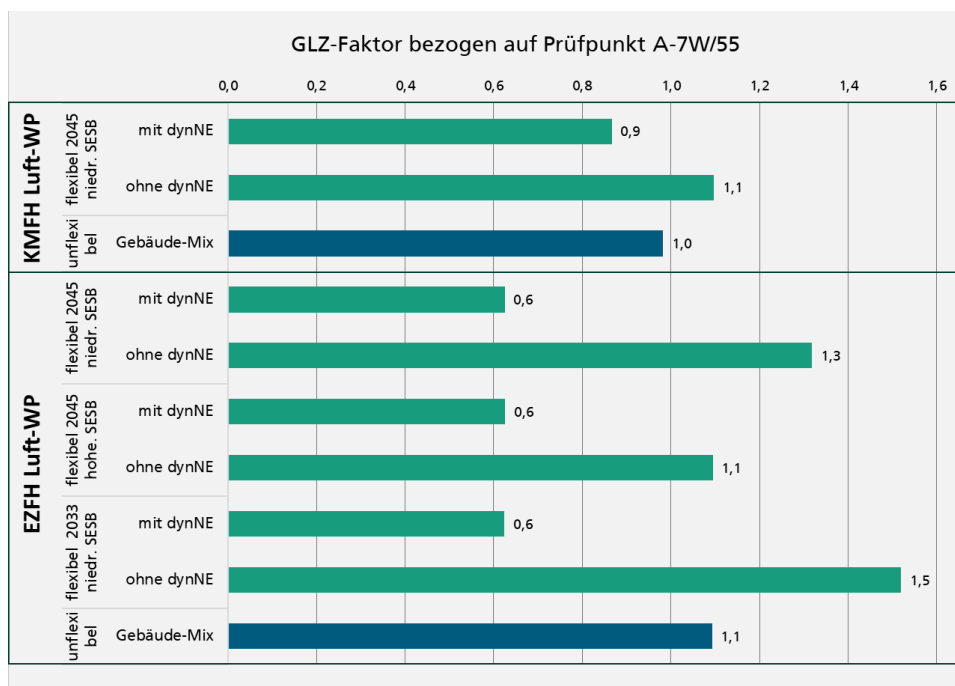


Abbildung 67: Gleichzeitigkeitsfaktoren für einen Pool von Luft-Wasser-Wärmepumpen für verschiedene Varianten flexibler Wärmepumpen (Standard) im Vergleich zu unflexiblen Wärmepumpen jeweils in EZFH und KMFH (dynNE: dynamisches Netzentgelt).

9.2.4 Wirtschaftlichkeit des flexiblen Betriebs von Wärmepumpen

Grundsätzlich wäre zu erwarten, dass bei Endverbraucherpreisen mit niedrigen fixen Strompreisbestandteilen (Szenario 2033 niedrige SESB / Szenario 2045 niedrige SESB) eine Flexibilität, die zwar mit Effizienzeinbußen einhergeht (z.B. eine Überhitzung des Speichers auf 80 °C), einen Vorteil aus Strompreisen nahe 0 ct/kWh ziehen kann. Die Ergebnisse zur Wirtschaftlichkeit zeigen jedoch nur begrenzte Einsparmöglichkeiten. Dies liegt an den nachfolgend erläuterten Zusammenhängen zwischen Strommarkt-Preisniveau und Wärmenachfrage.

In Abbildung 68 sind für beide Endverbraucherpreiszeitreihen mit niedrigen sonstigen energiebezogenen Strompreisbestandteilen (SESB) die Korrelationen zur Tagesmittel-Außentemperatur dargestellt. Festzustellen ist, dass in Zeiten mit hohem Wärmebedarf das Preisniveau hoch ist. Die Wärmepumpen sind in diesen Zeiten jedoch relativ unflexibel. Niedrige Strommarktpreise treten dagegen überwiegend an Tagen mit geringer Wärmenachfrage auf, sodass die absoluten Einsparmöglichkeiten durch den Einsatz von Flexibilität gering bleiben. Hintergrund ist unter anderem, dass die

zunehmende thermisch induzierte elektrische Nachfrage (dezentrale Wärmepumpen, Großwärmepumpen, Elektrodenkessel in der Fernwärme etc.) im Strommarkt das Preisniveau häufig dann in die Höhe treibt, wenn es kalt ist.

Flexibler Betrieb von
Wärmepumpen

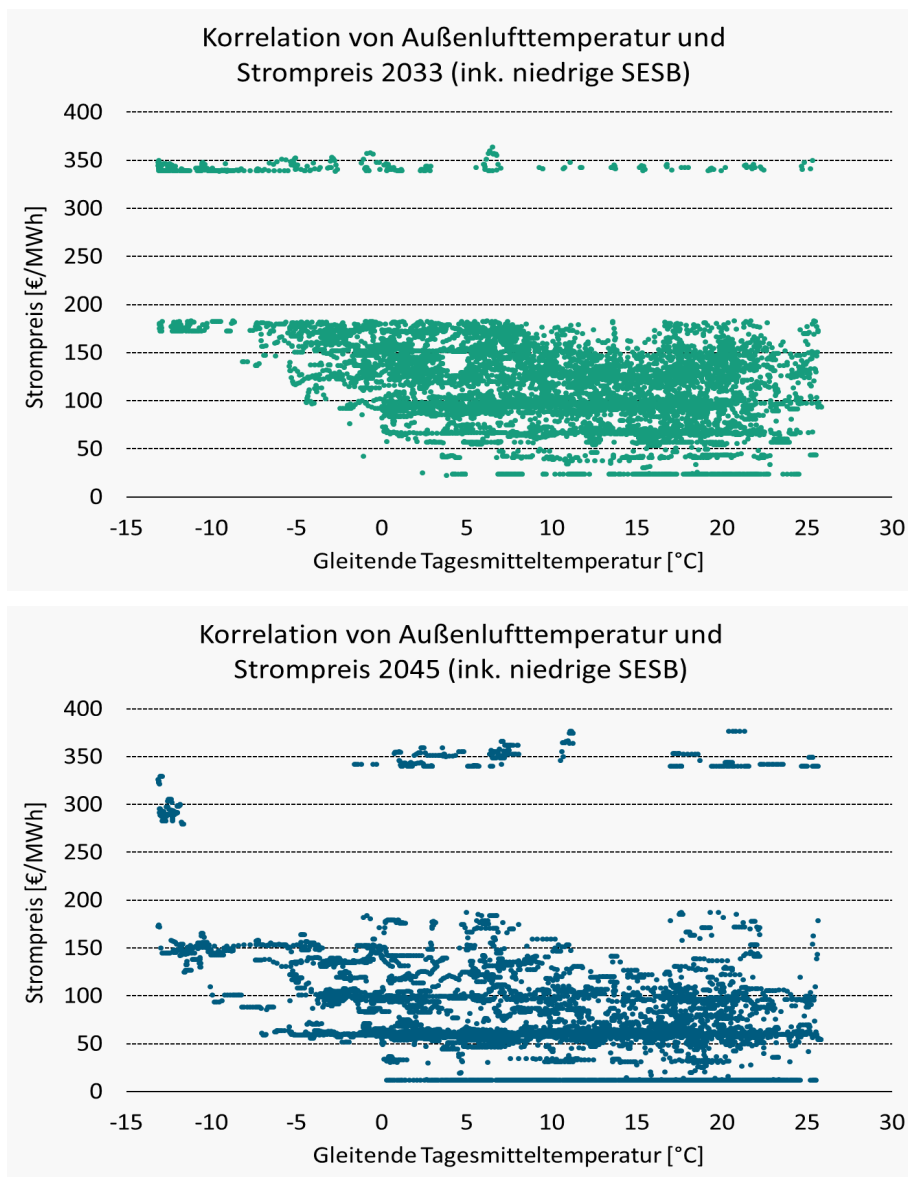


Abbildung 68: Korrelation zwischen Außenlufttemperatur und Strompreis (inkl. niedrigen sonstigen energiebezogenen Strompreisbestandteilen, SESB) für 2033 und 2045.

Tabelle 6 zeigt den Strombedarf und die Stromkosten von flexiblen und unflexiblen Wärmepumpen für die Jahre 2033 und 2045 im Vergleich. Bei den Stromkosten werden ausschließlich die Strombeschaffungskosten (Strommarktpreis inkl. MwSt.) ohne weitere energiebezogene Strompreisbestandteile ausgewertet. Für unflexible Wärmepumpen fallen für diesen Preisbestandteil rund 13 ct/kWh an.

Festzustellen ist, dass die Flexibilisierung generell zu Kosteneinsparungen durch Energieeffizienzgewinne führt. Speicherverluste werden vermieden und der COP wird gezielt maximiert. Der Einfluss von niedrigen oder hohen sonstigen energiebezogenen Strompreisbestandteilen (SESB) auf die Optimierung der Strombeschaffungskosten ist gering.

Szenario	2033	2045	Bezugsjahr 2033 + nied- rige SESB	Bezugsjahr 2045 + nied- rige SESB	Bezugsjahr 2045 + hohe SESB
Flexibilität	Unflexibel	Unflexibel	Flexibel	Flexibel	Flexibel
System- dimensionierung	Standard	Standard	Standard	Standard	Standard
Gebäude (Gebäude-Mix, Luft-Wasser-WP)	EZFH	EZFH	EZFH	EZFH	EZFH
Strom [kWh]	6.420	6.420	5.553	5.592	5.505
Kosten [€/a]	864	606	726	520	523

Tabelle 6: Einfluss der flexiblen Betriebsweise auf den Stromverbrauch und die Stromkosten von Luft-Wasser-WP in EZFH.

Der Einfluss der Systemdimensionierung flexibler Wärmepumpen auf den Stromverbrauch und die Stromkosten wird in Tabelle 7 aufgezeigt. Hierbei zeigt sich wiederum, dass Energieeffizienzsteigerungen entscheidend für Kosteneinsparungen sind (weniger Speicherverluste, weniger Heizstabeinsatz, höhere COPs durch die Verschiebung des Wärmepumpenbetriebs hin zu höheren Außenlufttemperaturen). Auch wenn Batterien ein höheres Potenzial als thermische Speicher aufweisen, ist ihr Beitrag zur Reduktion der Stromkosten von Wärmepumpen insgesamt gering.

Szenario	2045		Bezugsjahr 2045 + niedrige SESB						
	Unflexibel		Flexibel						
System- dimensionierung	Standard		Standard	Größerer Speicher	Größerer Speicher + Überdimens.	Batte- rie	Größerer Speicher + Komfortab- senkung	Größerer Spei- cher + Kom- fortabsen- kung + Über- dimens.	
Gebäude (Gebäude-Mix, Luft-Wasser-WP)	EZFH	KMFH	EZFH	KMFH	EZFH	EZFH	EZFH	EZFH	
Strom [kWh]	6.420	14.239	5.592	14.274	5.683	5.648	5.558	5.602	5.527
Kosten [€/a]	606	1.346	520	1.264	525	518	483	519	510

Tabelle 7: Einfluss der Systemdimensionierung auf die Wirtschaftlichkeit flexibler Wärmepumpen.

9.3 Ergebnisübersicht zur Flexibilität

Zusammenfassend lassen die Analysen zu den Flexibilitätseffekten bei Wärmepumpen folgende Schlussfolgerungen zu:

- Flexibilität hat für die Reduktion der Netzbelastung und für die Steigerung der Energieeffizienz deutliche Vorteile; für die Vermarktung am Strommarkt sind die Einsparpotenziale langfristig jedoch eher gering. Dies gilt für einen zukünftigen Strommarkt mit hoher Durchdringung von Flex-Optionen, die Preis-spreads reduzieren.
- Präventiv wirkende lokale Signale, wie dynamische Netzentgelte, können die Höchstlast bzw. Gleichzeitigkeit flexibler Lasten deutlich reduziert. Bereits heute besteht für Netzbetreiber mit § 14a EnWG die Möglichkeit, kurativ einzugreifen, um Leistungsspitzen von Wärmepumpen zu reduzieren.

- Größere Wärmespeicher bieten kaum Mehrwert gegenüber der heute üblichen Auslegung; zudem bietet eine Komfortabsenkung nur geringe Einsparpotenziale.
- Batterien lassen sich bei Strompreisunterschieden grundsätzlich effektiver einsetzen als thermische Speicher; ihre Speicherkapazität ist jedoch im Verhältnis zum Stromverbrauch von Wärmepumpen relativ klein, wodurch sie Leistungsspitzen von Wärmepumpen nur geringfügig reduzieren können.
- Es ist damit zu rechnen, dass sich prädiktive Regelungen im Feld zur Steigerung der Effizienz durchsetzen werden – wie es auch in dieser Studie für die simulative Bewertung der Flexibilitäterschließung von Wärmepumpen unterstellt wurde. Dies kann einerseits die Effizienz unflexibler Wärmepumpen erhöhen, andererseits die Schwelle für einen flexiblen Betrieb senken.
- Aus der Kombination von Einsparungen bei dynamischen Netzentgelten, Effizienzsteigerungen und der Flexibilitätsvermarktung an den Strommärkten kann sich ein tragfähiges Geschäftsmodell für den flexiblen Wärmepumpeneinsatz ergeben.

Flexibler Betrieb von
Wärmepumpen

1 0

Literatur

- [1] DIN EN 14511: Luftkonditionierer, Flüssigkeitskühlsätze und Wärmepumpen für die Raumbeheizung und -kühlung und Prozesskühler mit elektrisch angetriebenen Verdichtern, 2023
- [2] Winter, et.al.: Untersuchungen der Gleichzeitigkeit in kleinen und mittleren Nahwärmenetzen, Euroheat & Power, 2001
- [3] DIN EN 12831: Energetische Bewertung von Gebäuden - Verfahren zur Berechnung der Norm-Heizlast, 2025
- [4] 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
- [5] Luft/Wasser-Wärmepumpen von NIBE - Erneuerbare Energie aus der Außenluft; <https://www.nibe.eu/de-de/produkte/waermepumpen/luft-wasser-waermepumpen/>
- [6] Referat für Gesundheit und Umwelt München: Grundwassertemperaturen München: Messungen 2009-2010
- [7] Stadtwerke München, Lastprofil Wärmepumpe: <https://www.swm-infrastruktur.de/strom/netzzugang/bedingungen/waermepumpe>
- [8] Synthetische Last- und Erzeugungsprofile in den Sektoren Strom, Wärme und Mobilität, Fraunhofer ISE, <https://synpro-lastprofile.de/>
- [9] Fischer, D.; Wolf, T.; Wapler, J.; Hollinger, R.; Madani, H.: Model-based flexibility assessment of a residential heat pump pool; Energy, Volume 118, pp. 853-864, 2017
- [10] Phillipos, S., Warmuth, W.: Photovoltaics Report, Fassung vom 29. Mai 2025 basierend auf Marktstammdatenregister- MaStR (Date: 31.10.2025), <https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/Photovoltaics-Report.pdf>