

Einfluss konkreter Wärmepumpen-Typen auf die Wirtschaftlichkeit und Netzverträglichkeit von PV-Wärme-Systemen in Wohngebäuden

Tjarko Tjaden, Hauke Hoops, Johannes Rolink

Hochschule Emden/Leer, Constantiaplatz 4, 26723 Emden

tjarko.tjaden@hs-emden-leer.de

1 Hintergrund und Fragestellung

Wirft man einen Blick auf die zahlreich publizierten Ergebnisse der Energiesystemmodelle der großen Forschungsinstitute, so stellt man fest, dass elektrische Wärmepumpen in Deutschland mit Abstand die wichtigste Wärmequelle im Bereich der Wohngebäude sein werden¹. Aufgrund der in den letzten Jahren stark gefallen Stromgestehungskosten und Einspeisevergütungen für Photovoltaik, sind Prosumer-Fragestellungen zudem stark in den Vordergrund gerückt. Grundsätzlich kann man davon ausgehen, dass dabei im Bereich der Einfamilienhäuser bei üblichen PV-Auslegungen bis 10 kWp ohne Batteriespeicher Autarkiegrade für Wohnen und Heizen von 25 bis 45 % möglich sind. Mit Batteriespeichern liegen diese dann bei bis zu 75 %². Neben den hohen Investitionskosten führen mindestens zwei weitere Aspekte dazu, dass sich die Zubauzahlen von Wärmepumpen nicht so schnell wie notwendig entwickeln. Zum einen gibt es immer noch Befürchtungen in Bezug auf die Belastung des Stromnetzes. Zum anderen kann man eine breite Streuung der in der Praxis erreichten Betriebskosten von Wärmepumpensystem beobachten³. In beiden Fällen spielt die Effizienz von Wärmepumpen, also der saisonale Verlauf der Arbeitszahlen, eine große Rolle.

Eine zentrale Frage ist daher, welchen Einfluss die Wahl der Wärmepumpen-Kategorie (Luft/Wasser, Sole/Wasser) auf die Effizienz in vergleichbaren Szenarien hat und ob Unterschiede aus der Wahl der Regeltechnologie (einstufig, geregelt) resultieren. Darüber hinaus stellt sich die Frage, welche Bandbreiten sich innerhalb der einzelnen Kategorien ergeben, wenn man zwischen den verschiedenen marktverfügbaren Wärmepumpen-Modellen unterscheidet. Diese und weitere Fragen wurden durch den Einsatz einer neuen Simulationsbibliothek für Wärmepumpen beantwortet.

¹ P. Stechele et. al., „Wege zu einem klimaneutralen Energiesystem“, Fraunhofer ISE, 2020.

² T. Tjaden, F. Schnorr, J. Weniger, J. Bergner, und V. Quaschnig, „Einsatz von PV-Systemen mit Wärmepumpen und Batteriespeichern zur Erhöhung des Autarkiegrades in Einfamilienhaushalten“, gehalten auf der 30. Symposium Photovoltaische Solarenergie, Bad Staffelstein, März 2015.

³ Danny Günter et. al., „Wärmepumpen in Bestandsgebäuden – Ergebnisse aus dem Forschungsprojekt WPsmart im Bestand“, Abschlussbericht. Fraunhofer ISE, Juli 2020.

2 Datengrundlage und Modelle

Um die Unterschiede der Effizienz und Netzbelastung bedingt durch das Heizungssystem, den Standort und die Wahl der Wärmepumpe herauszustellen, wurden verschiedene Szenarien simuliert. Im Folgenden werden die Daten und Modelle sowie festgelegten Parameter beschrieben.

2.1 Datengrundlage

2.1.1 Wetter

Die Datengrundlage für das Wetter stammt aus den aktualisierten Testreferenzjahren (TRJ) des Deutschen Wetterdienstes. Die TRJ sollen das typische Wetter für 15 Regionen in Deutschland repräsentieren, siehe Tabelle 1 und Abbildung 1. Für jeden Standort gibt es dabei drei verschiedene Szenarien: durchschnittliches Jahr, extremer Winter und extremer Sommer. Zusätzlich gibt es die Szenarien neben dem Jahr 2015 (heutige Wetterbedingungen) noch für das Jahr 2045, wodurch die Klimaerwärmung Berücksichtigung findet. Somit ergeben sich 90 verschiedene Wetterzeitreihen in 60-minütiger Auflösung. Um die Daten in den Simulationen mit einer 1-minütlichen Auflösung verwenden zu können, wurde der Datensatz durch lineare Interpolation erweitert. Während dieser Ansatz z.B. für Luftdruck und Temperatur vertretbar ist, bildet er die starken Schwankungen der Sonneneinstrahlung nicht ab. Daher wurden über das Webtool www.pvmodelling.org auf der Basis des einminütigen offenen Messdatensatzes des Baseline Surface Radiation Network (BSRN) mit einem Algorithmus von Hofmann et. al. die Zeitreihen der Globalstrahlung für alle Testreferenzjahre neu generiert. Ein weiterer Algorithmus von Hofmann et. al. wurde zur Berechnung der entsprechenden Diffusstrahlungszeitreihen verwendet.^{4,5} Die beschriebenen Wetterdaten wurden zudem als Datensatz veröffentlicht.⁶

2.1.2 Lastprofile

Für die realitätsnahe Abbildung der Netzeinspeisung und des Netzbezugs sowie der Wärmepumpennutzung sollten auch die elektrischen und thermischen Lastprofile in einer hohen zeitlichen Auflösung vorliegen. Für die elektrische Haushaltslast und den Trinkwarmwasserbedarf wird auf 1-minütige Lastprofile zurückgegriffen, welche mit Hilfe der Richtlinie VDI 4655 für jeden Standort erstellt wurden. Für alle Gebäude wurde dabei ein elektrischer Jahresverbrauch von 4000 kWh und ein Trinkwarmwasserbedarf von 1875 kWh angenommen. Die Heizlast der Gebäude wurde nicht aus der VDI 4655 sondern aus einem Gebäudemodell abgeleitet.

⁴ Hofmann, M., Riechelmann, S., Crisosto, C., Mubarak, R., & Seckmeyer, G. (2014). Improved Synthesis of Global Irradiance with One-Minute Resolution for PV System Simulations. *International Journal of Photoenergy*, 2014, 1–10. <https://doi.org/10.1155/2014/808509>

⁵ Hofmann, M.; Seckmeyer, G. A New Model for Estimating the Diffuse Fraction of Solar Irradiance for Photovoltaic System Simulations. *Energies* 2017, 10, 248. <http://dx.doi.org/10.3390/en10020248>

⁶ Tjarko Tjaden. (2021). RE-Lab-Projects/TRY_DE_2015_2045: Test Reference Years (TRY) for 15 typical regions in germany with special regards on realistic radiation data on a 1min timescale (v1.4.0) [Data set]. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.5105765>

Tabelle 1: Testreferenzstandorte mit repräsentativer Region

| Nr. | Station | Region |
|-----|------------------------|--|
| 1 | Bremerhaven | Nordseeküste |
| 2 | Rostock | Ostseeküste |
| 3 | Hamburg | Nordwestdeutsches Tiefland |
| 4 | Potsdam | Nordostdeutsches Tiefland |
| 5 | Essen | Niederrheinisch-westfälische Bucht und Emsland |
| 6 | Bad Marienburg | Nördliche und westliche Mittelgebirge, Randgebiete |
| 7 | Kassel | Nördliche und westliche Mittelgebirge, zentrale Bereiche |
| 8 | Braunlage | Oberharz und Schwarzwald (mittlere Lagen) |
| 9 | Chemnitz | Thüringer Becken und Sächsisches Hügelland |
| 10 | Hof | Südöstliche Mittelgebirge bis 1000 m |
| 11 | Fichtelberg | Erzgebirge, Böhmer- und Schwarzwald oberhalb 1000 m |
| 12 | Mannheim | Oberheingraben und unteres Neckartal |
| 13 | Mühdorf | Schwäbisch-fränkisches Stufenland und Alpenvorland |
| 14 | Stötten | Schwäbische Alb und Baar |
| 15 | Garmisch Partenkirchen | Alpenrand und -täler |

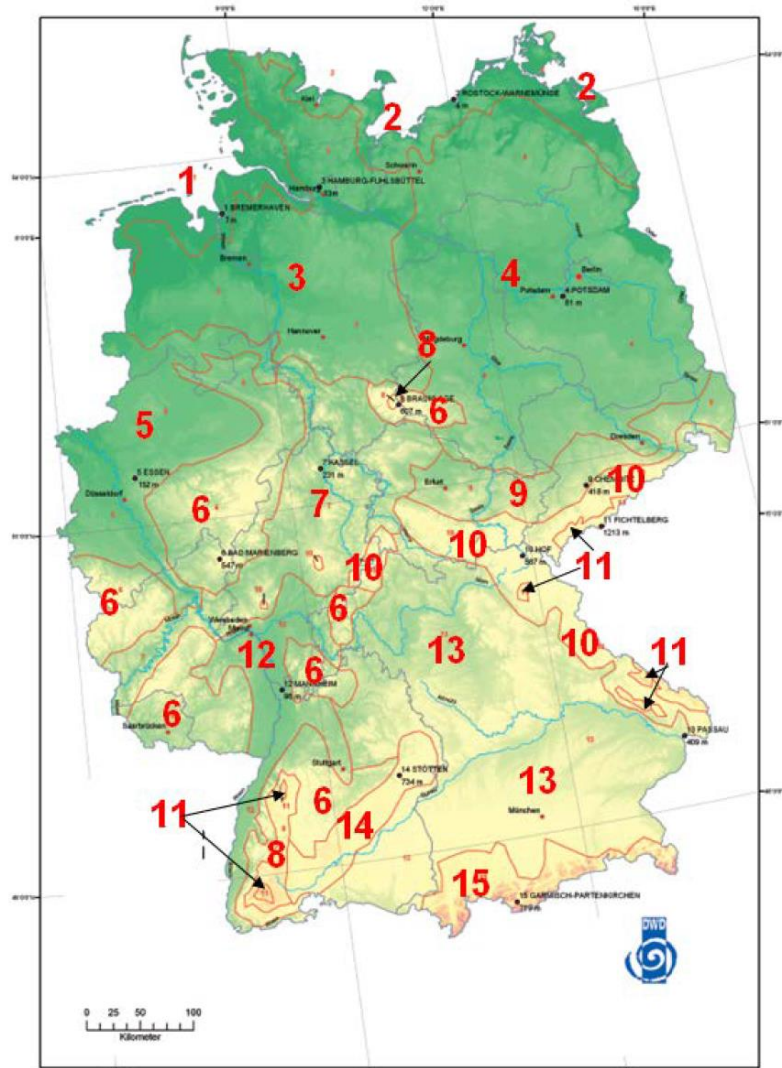


Abbildung 1: Regionen der Testreferenzjahre (TRJ). (Quelle: DWD)

2.2 Modelle

2.2.1 Photovoltaik

Die Berechnung der Photovoltaik-Zeitreihen erfolgte über die Software-Bibliothek pvlib⁷ mit den in Tabelle 2 aufgeführten Parametern. Hieraus resultierten spezifische Erträge je nach Jahr und Standort für Süd-Anlagen von 895 bis 1200 kWh/kWp und für Ost-West-Anlagen von 702 bis 911 kWh/kWp.

Tabelle 2: Verwendete Parameter der pvlib Bibliothek zur Photovoltaik Simulation

| | |
|---|-----------------------------|
| Generator- und Wechselrichter-Modell | NREL PVWatts |
| Modultyp und Befestigung | Glas-Folie, Aufdach-Montage |
| Installierte Leistung (Modul / Wechselrichter) | 10 kWp / 10 kVA |
| Varianten für Ausrichtung und Neigung | 35° Süd und 35° Ost-West |

2.2.2 Batteriespeicher

Batteriespeicher wurden als AC-gekoppelte Systeme mit Hilfe der Software-Bibliothek bslib⁸ mit den in Tabelle 3 dargestellten Parametern simuliert.

Tabelle 3: Verwendete Parameter der bslib Bibliothek zur Batteriespeicher Simulation

| | |
|---|--|
| Batteriespeicher-Typ | AC-gekoppelt |
| Batteriespeicher-Modell | Generisches Modell (SG1) |
| Nutzbare Kapazität | 0 / 1 / 2 / 3 / 4 / 5 / 6 / 7 / 8 / 9 / 10 kWh |
| Leistung des Batteriewechselrichters | 0,5 kW/kWh |

2.2.3 Gebäudeheizlast

Die Heizlast der Gebäude wurde durch Festlegung von Gebäudeparametern nach Tabelle 4 basierend auf den Wetterdaten berechnet. Hierdurch ergeben sich Norm-Heizlasten zwischen 3,5 und 4,2 kW für „Neubau (35/28)“ sowie 6,0 bis 7,4 kW für „Altbau (55/45)“, was einem Altbau in teilsaniertem Zustand entspricht.

Tabelle 4: Verwendete Parameter zur Berechnung der Heizlasten der Gebäude

| | Neubau (35/28) | Altbau (55/45) |
|--------------------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Wohnfläche | 150 m ² | 150 m ² |
| spezifische Heizlast | 0,6 W/(m ² K) | 1,2 W/(m ² K) |
| Heizgrenztemperatur | 12 °C | 15 °C |
| Auslegung: Vorlauf / Rücklauf | 35 / 28 °C | 55 / 45 °C |

⁷ William F. Holmgren, Clifford W. Hansen, and Mark A. Mikofski. "pvlib python: a python package for modeling solar energy systems." Journal of Open Source Software, 3(29), 884, (2018). <https://doi.org/10.21105/joss.00884>

⁸ Tjarko Tjaden, Kai Rösken & Hauke Hoops. (2022). RE-Lab-Projects/bslib (v0.4). Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.6562941>

Sowohl für die Deckung des Trinkwarmwassers als auch der Heizung stand je ein Wärmespeicher mit 300 Litern Volumen zur Verfügung. Diese wurden über eine Hysterese von 3 K durch die Wärmepumpe auf ihrem Sollwert gehalten.

2.2.4 Wärmepumpen

Zur Simulation der Wärmepumpen wurde die neue Software-Bibliothek hplib⁹ angewendet, die über kalibrierte Parameter nach Heat Pump KEYMARK¹⁰ für 506 Wärmepumpenmodelle von 30 verschiedenen Herstellern verfügt. Darüber hinaus stellt die hplib jeweils eine generische Wärmepumpe pro Kategorie bereit, die der mittleren Effizienz aller Wärmepumpen derselben Kategorie entspricht. Neben der Berechnung von Heizkreis- und Sole-Temperaturen in Abhängigkeit der Außentemperatur ermöglicht die hplib vor allem die Simulation von Heizleistung, elektrischer Leistung, COP und Massenstrom des Heizwassers.

3 Methodik

Um praxisnahe Antworten auf die Fragestellungen zur Bandbreite der Betriebsergebnisse von Prosumer-Haushalten mit Wärmepumpe in Bezug auf Effizienz und Netzbelastung geben zu können, wurde wie folgt vorgegangen:

- Berechnung der Norm-Heizlast für jedes Gebäude über die Norm-Außentemperatur an jedem Standort.
- Berechnung der Heizleistung aller verfügbaren Wärmepumpen bei -7 °C Außentemperatur und Auslegungstemperatur des Heizungsvorlaufs.
- Zuordnung aller Wärmepumpen der hplib-Datenbank zu einem Simulationsdurchlauf, bei denen die Wärmepumpe mindestens die Norm-Heizlast erfüllt und höchstens 25 % überdimensioniert ist.
- Begrenzung auf 15 Wärmepumpen-Modelle pro Kategorie und Gebäude.

Durch diese Vorgehensweise sollte sichergestellt werden, dass die Gebäude mit möglichst vielen Wärmepumpen simuliert werden, die in der Praxis durch das Heizungshandwerk unter Anwendung gängiger Auslegungshilfen für einen monovalenten Betrieb ausgewählt werden.

Anschließend wurden alle 133.320 Kombinationen aus Wärmepumpe, Gebäude, Standort, Wetterjahr, PV-Anlage und Batteriespeicher in einer 1-minütigen Jahressimulation berechnet. Neben der Auswertung in dieser Veröffentlichung steht der gesamte Ergebnis-Datensatz zusätzlich in Tabellenform sowie als Web-Tool unter offener Lizenz zur Verfügung, siehe Abschnitt „Datensatz und Web-Tool“.

⁹ Tjarko Tjaden, Hauke Hoops & Kai Rösken. (2022). RE-Lab-Projects/hplib: v1.7 (v1.7). Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.6409831>

¹⁰ <https://keymark.eu/en/products/heatpumps/certified-products>

4 Auswertung

Zunächst soll auf die Systemjahresarbeitszahlen (SJAZ) eingegangen werden, die das Verhältnis von Wärmeverbrauch zu Stromverbrauch repräsentieren und damit thermische Speicherverluste mitberücksichtigen.

4.1 Effizienz

Die Hälfte (mittlere Quartile) aller Luft/Wasser-Wärmepumpen haben SJAZ zwischen 2,67 bis 3,42 bei einem Median von 3,09. Die Sole/Wasser-Wärmepumpen liegen erwartungsgemäß etwas höher zwischen 3,51 bis 4,08 bei einem Median von 3,76. Der Unterschied der SJAZ zwischen Gebäuden mit niedrigen Heizkreistemperaturen (Neubau 35/28) und mittleren Temperaturen (Altbau 55/45) liegt im Mittel bei 0,65. Abbildung 2 zeigt darüber hinaus auf, dass vor allem bei Luft/Wasser-Wärmepumpen große Unterschiede der SJAZ in Abhängigkeit vom Standort bestehen. Während in einer Region mit milden Wintertemperaturen (TRJ 5, Niederrheinisch-westfälische Bucht und Emsland) Luft- und Sole/Wasser-Wärmepumpen im Neubau fast gleiche Jahresarbeitszahlen aufweisen, haben Sole/Wasser-Wärmepumpen in der Region 11 (Erzgebirge, Böhmer- und Schwarzwald oberhalb 1000 m) deutliche Vorteile.

Eine wichtige Erkenntnis ist zudem, dass die SJAZ der generischen Wärmepumpenmodelle der hplib gut mit dem Median der marktverfügbaren Wärmepumpen übereinstimmen. Weiterhin zeigt die Abbildung 2, dass die Bandbreiten zwischen dem obersten und untersten Quartil sowie den übrigen Werten der SJAZ bei den Luft/Wasser-Wärmepumpen tendenziell größer sind als bei den Sole/Wasser-Wärmepumpen.

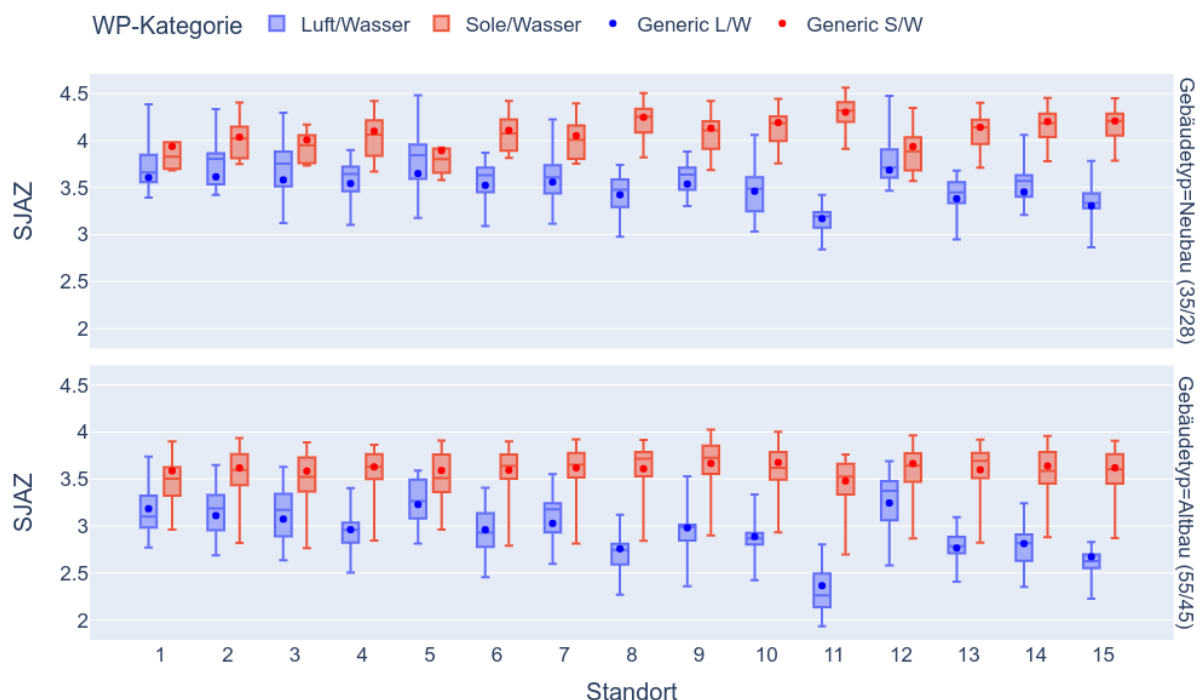


Abbildung 2: Verteilung der SJAZ getrennt nach TRJ-Standort (2015, durchschnittliches Jahr) und Gebäudetyp. Zusätzlich Ergebnisse der generischen Wärmepumpen der hplib.

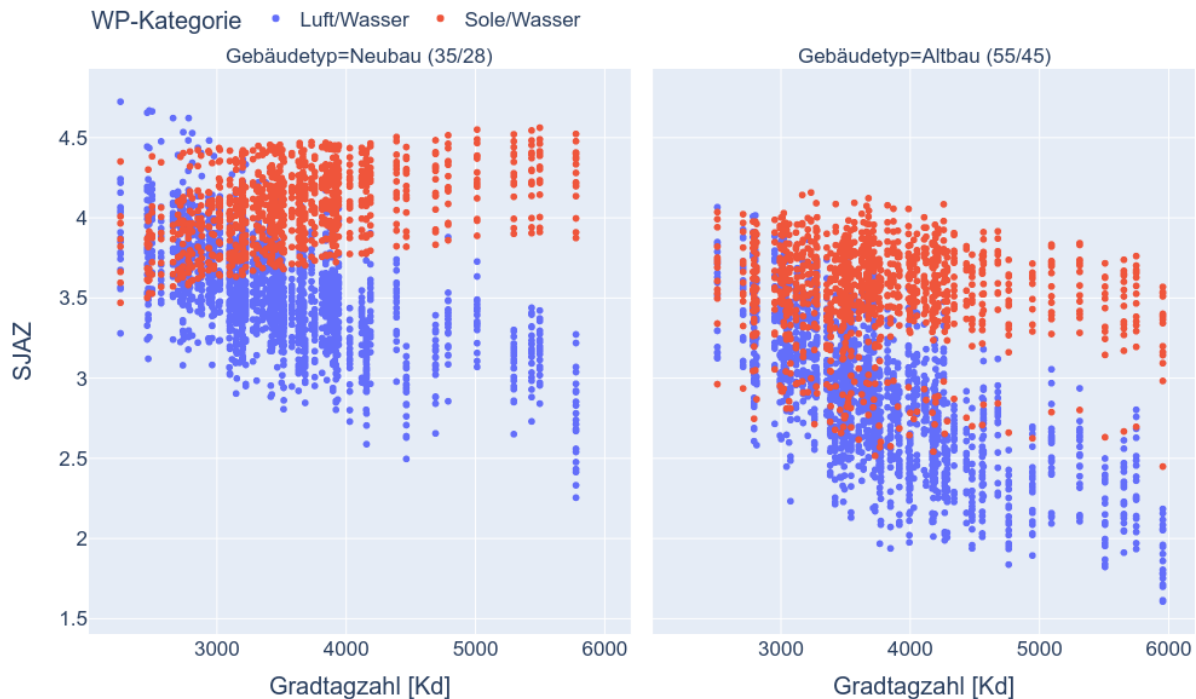


Abbildung 3: Verteilung der SJAZ über der Gradtagszahl (alle TRJ), getrennt nach Gebäudetyp.

Mit Hilfe der Abbildung 3 kann der Zusammenhang über die Gradtagszahl des Winterjahres auf eine andere Art dargestellt werden. Je kälter und länger die Winterperiode, desto stärker sinken die SJAZ der Luft/Wasser-Wärmepumpen gegenüber denen der Sole/Wasser-Wärmepumpen ab. Dennoch kann festgestellt werden, dass es für Standorte mit Gradtagszahlen kleiner 4000 Kd, was etwa zwei Drittel der Standorte entspricht, immer mehrere Luft/Wasser-Wärmepumpen zur Verfügung stehen, die eine SJAZ von größer 3,5 aufweisen. Dieser Wert entspricht in grober Näherung der Jahresarbeitszahl, ab der die Wärmepumpe hinsichtlich der Betriebskosten wirtschaftlich gegenüber anderen Heizungssystemen betrieben werden kann.

4.2 Netzbelastung

Während den Betreiber der Wärmepumpe vor allem die Effizienz im Betrieb interessiert, stellt sich aus Systemsicht bzw. Sicht der Netzbetreiber noch die Frage, inwieweit die unterschiedlichen Wärmepumpen in der kalten Jahreszeit zu Unterschieden in der Netzbelastung führen. Dazu wurde in allen Simulationen für den kältesten Tag der Tagesmittelwert des Netzbezugs gebildet. Abbildung 4 stellt die Ergebnisse über die verschiedenen Standorte sowie getrennt nach durchschnittlichem sowie extremem Winterjahr dar. Wie zu erwarten, liegt der Median des maximalen Netzbezugs bei den Luft/Wasser-Wärmepumpen höher als bei den Sole/Wasser-Wärmepumpen. Schaut man jedoch auf das Gebäude „Neubau (35/28)“ so arbeiten auch die Luft/Wasser-Wärmepumpen immer noch sehr effizient, was sich aus dem Vergleich des mittleren Netzbezugs mit der Norm-Heizlast ableiten lässt.

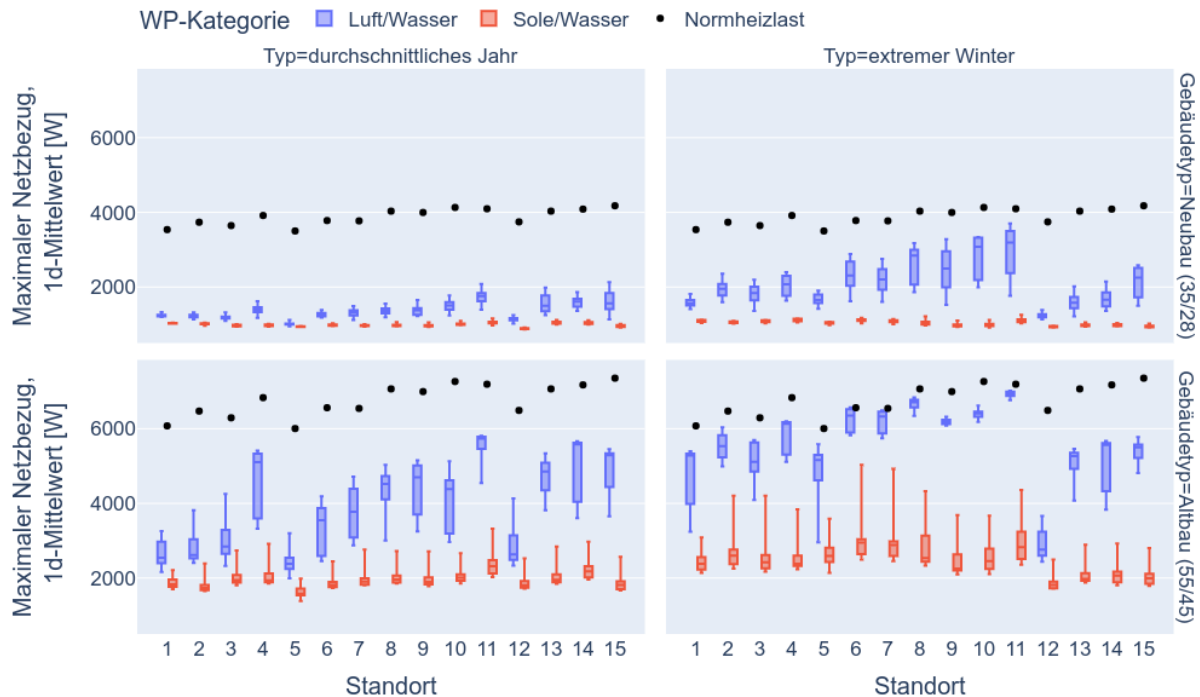


Abbildung 4: Verteilung des maximalen Netzbezugs (Tagesmittelwert) über der Gradtagszahl (TRJ 2015), getrennt nach Gebäudetyp sowie Darstellung der Normheizlast der Gebäude.

Im extremen Winterjahr kann man jedoch für die Standorte 6 bis 11 eine überdurchschnittliche Erhöhung und zudem eine breite Streuung des maximalen Netzbezugs beobachten. Neben der allgemein schlechteren Effizienz bei kalten Außentemperaturen liegt dies vor allem daran, dass bei manchen Systemen verstärkt der Heizstab zum Einsatz kam.

Beim Gebäude „Altbau (55/45)“ wird der Effekt nochmal deutlicher, dass hohe Systemtemperaturen an kalten Wintertagen viele Luft/Wasser-Wärmepumpen an ihre Grenze bringen. Im Jahr „extremer Winter“ gibt es nur noch wenige Geräte, die den Mittelwert des Netzbezugs unter 4000 W halten können. Dies macht deutlich, dass aus Sicht von Netzbetreibern und für die allgemeine Systemstabilität Luft/Wasser-Wärmepumpen möglichst nicht zu klein dimensioniert und hinsichtlich ihrer Effizienzparameter (hohe COP-Werte) bei kalten Quell- und hohen Zieltemperaturen ausgewählt werden sollten. Weiterhin wird nochmals vor Augen geführt, dass jedes Grad an Reduktion der notwendigen Vorlauftemperaturen einen Beitrag zur Netzintegration darstellt.

4.3 Autarkiegrade

Doch nicht nur aus Sicht der Systemstabilität ist eine hohe Effizienz von Wärmepumpen relevant. So resultieren hohe SJAZ und vor allem gute Arbeitszahlen in den Wintermonaten ebenfalls in hohen Autarkiegraden, siehe Abbildung 5.

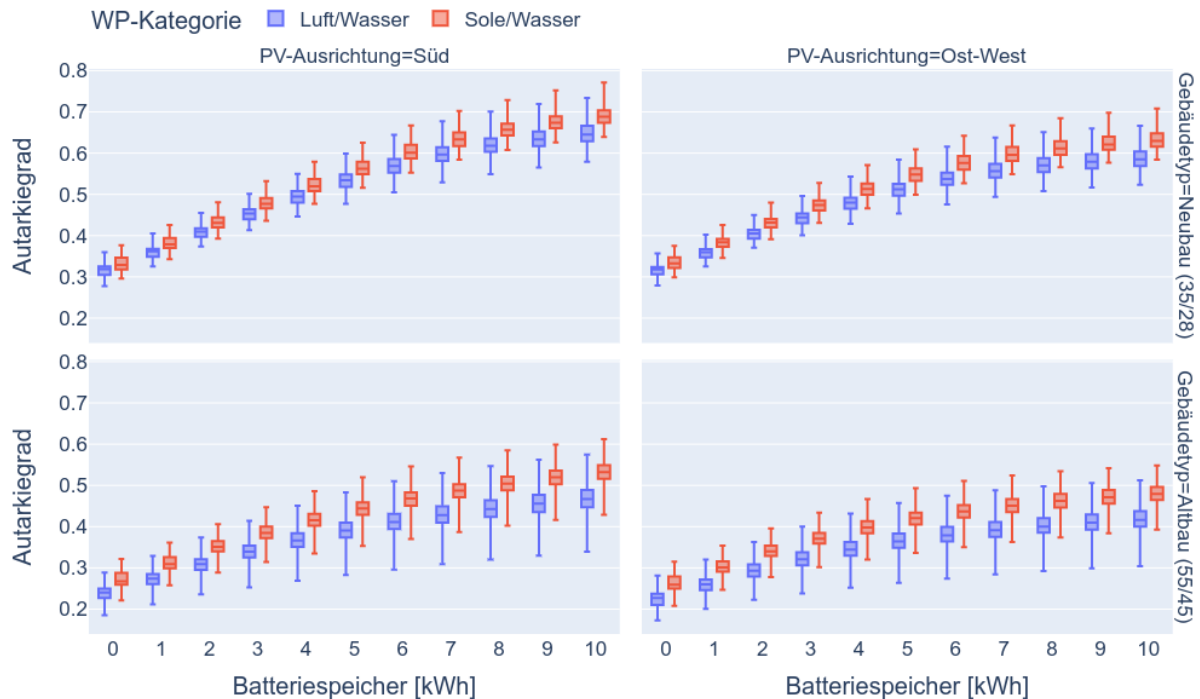


Abbildung 5: Verteilung der Autarkiegrade über der nutzbaren Speicherkapazität, getrennt nach Gebäudetyp (Standorte für das TRJ 2015, durchschnittliches Jahr) und PV-Ausrichtung (PV-Leistung = 10 kWp).

Hierbei liegen zwischen den eher schlechten und sehr guten Wärmepumpen Unterschiede im Autarkiegrad im Bereich von 10 bis 20 Prozentpunkten. Um eine derartige Steigerung des Autarkiegrads mit einem Batteriespeicher zu erreichen, sind 2 bis 4 kWh nutzbare Speicherkapazität notwendig.

4.3 Ökonomie

Durch die Veränderung des Autarkiegrades wirken sich effiziente Wärmepumpen auch auf die Höhe der Netzbezugskosten aus. Zusätzlich steht mehr Solarstrom zur Netzeinspeisung bereit. Daher wurden die Simulationsergebnisse mit den Parametern aus Tabelle 5 verrechnet, indem die Bilanz aus jährlichen Strombezugskosten und Erlösen aus Netzeinspeisung gebildet wurden, kurz „bilanzielle Stromkosten“.

Abbildung 6 fasst die Ergebnisse zusammen: Obwohl die Autarkiegrade ohne Batteriespeicher unabhängig von der Ausrichtung der PV-Anlage nahezu identisch sind, liegen die bilanziellen Stromkosten bei den Anlagen mit Süd-Ausrichtung aufgrund der höheren Netzeinspeisung um ca. 150 Euro pro Jahr niedriger. Durch die Nutzung von Batteriespeichern verstärkt sich der Vorteil der Süd-Ausrichtung nochmals auf bis zu 250 bis 300 Euro pro Jahr. Eine kWh Speicherkapazität wirkt sich ökonomisch bei Anlagen mit Süd-Ausrichtung folglich stärker aus als bei Ost-West-Ausrichtung.

Tabelle 5: Verwendete Parameter für die ökonomische Auswertung der Betriebskosten

| | |
|--|--------------|
| Netzeinspeisung: Einspeisevergütung | 6,5 Cent/kWh |
| Netzbezug: Stromtarif | 35 Cent/kWh |

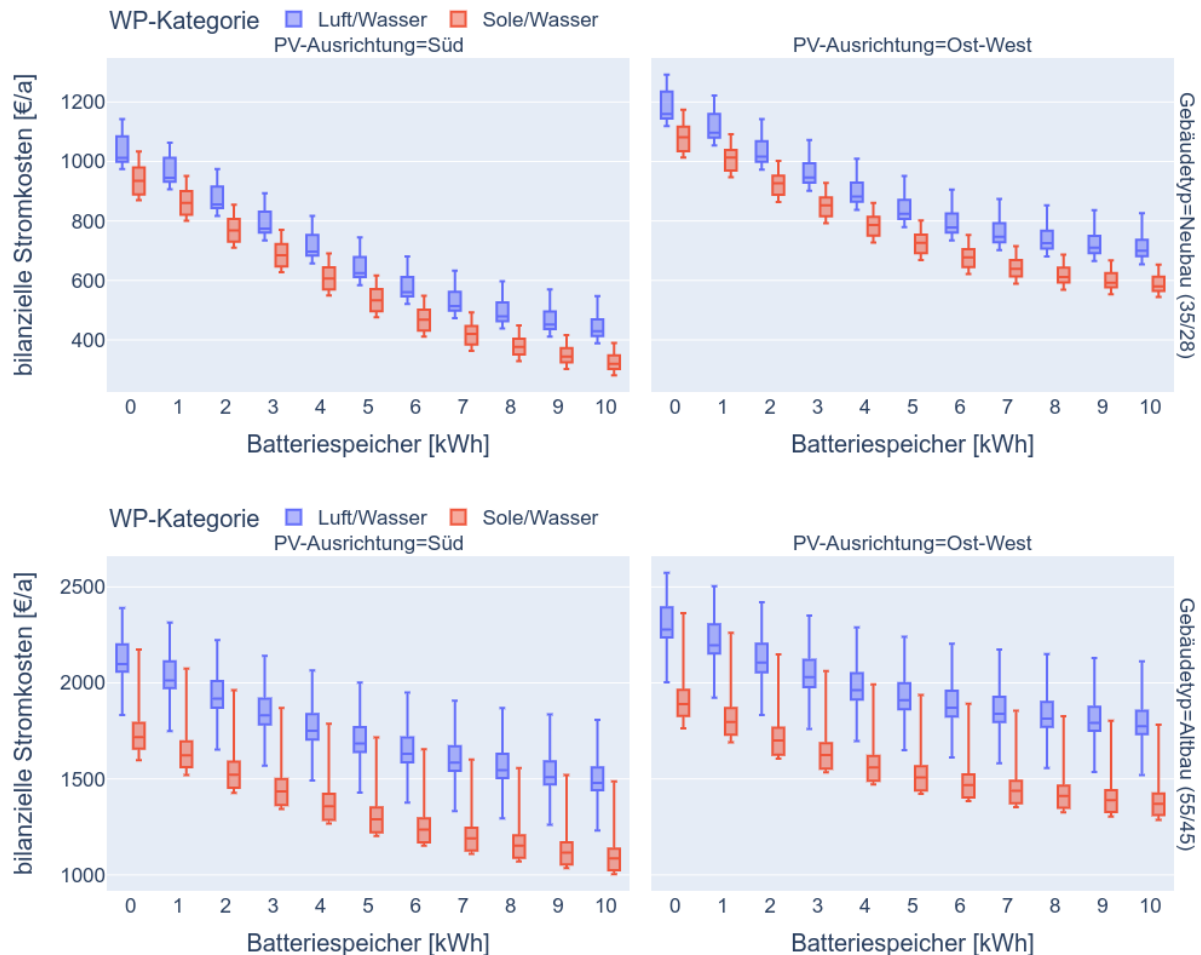


Abbildung 6: Verteilung der jährlichen bilanziellen Stromkosten über der nutzbaren Speicherkapazität, getrennt nach Gebäudetyp (Standorte für das TRJ 2015, durchschnittliches Jahr) und PV-Ausrichtung (PV-Leistung = 10 kWp).

Vor allem beim Gebäude „Altbau (55/45)“ zeigt sich nochmal eindrücklich, dass die Wahl der konkreten marktverfügbaren Wärmepumpe zu Unterschieden der bilanziellen Stromkosten im Bereich von 100 bis 500 Euro pro Jahr führen kann. Bei einer Lebensdauer von 20 Jahren dürfte die beste Wärmepumpe folglich 10.000 Euro teurer in der Investition sein, um die gleichen Gesamtkosten wie die schlechteste Wärmepumpe nach zwanzig Jahren aufzuweisen.

Eine weitere Feststellung besteht darin, dass bei den PV-Anlagen mit Ost-West-Ausrichtung ab einer Speicherkapazität von 7 kWh eine weitere Vergrößerung der Speicherkapazität kaum noch zu einer Verringerung der bilanziellen Stromkosten führt. Dieser Effekt ist bei Süd-Ausrichtung weniger stark ausgeprägt.

5 Zusammenfassung

Durch den Vergleich der generischen Wärmepumpen-Modelle der hplib-Bibliothek mit den Ergebnissen der marktverfügbaren Wärmepumpen konnte nachgewiesen werden, dass man die generischen Modelle als repräsentativ in Bezug auf eine mittlere Effizienz der jeweiligen Wärmepumpen-Kategorie bewerten kann.

Insgesamt zeigt sich, dass marktverfügbare Wärmepumpen (vor allem Luft/Wasser-Wärmepumpen) eine große Bandbreite in Bezug auf die Systemjahresarbeitszahlen aufweisen. Durch die Wahl möglichst effizienter Geräte mit möglichst hohen Leistungszahlen bei kalten Quell- und hohen Zieltemperaturen können die bilanziellen Stromkosten vor allem in Gebäuden mit hohen Systemtemperaturen um bis zu 500 Euro pro Jahr niedriger ausfallen.

Grundsätzlich wurde nochmal aufgezeigt, in welcher Größenordnung Sole/Wasser-Wärmepumpen zu niedrigeren bilanziellen Stromkosten führen. Zudem ist diese Wärmepumpenkategorie robuster wenn es um die Netzverträglichkeit geht. Lediglich in Gebieten mit milden Wintern (Gradtagszahlen kleiner 4000 Kd) und bei Realisierung möglichst niedriger Systemtemperaturen sollten Luft/Wasser-Wärmepumpen auch bei flächendeckendem Einsatz in Deutschland nicht zu kritischen Situationen oder großem Ausbauaufwand der Verteilnetze führen.

Datensatz und Web-Tool

Der gesamte Ergebnisdatensatz aus 133.320 Jahressimulationen kann als Ergebnistabelle (CSV, Lizenz: CC-BY-4.0) sowie als Web-Tool mit Ansicht der konkreten Wärmepumpen-Hersteller und -Modelle eingesehen werden unter:

<https://re-lab.hs-emden-leer.de/PVSYM22>

Es wird darauf hingewiesen, dass maximal 15 Wärmepumpen pro Gebäude und Wärmepumpenkategorie simuliert wurden. Die hplib-Datenbank bietet je nach geforderter Heizlast häufig mehr als 15 passende Modelle, so dass der Datensatz als nicht „abschließend / vollständig“ zu interpretieren ist.

Danksagung

Das Projekt PIEG-Strom wird im Rahmen des Förderrahmens „WIPANO - Wissens- und Technologietransfer durch Patente und Normen“ durch Mittel des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi) ermöglicht (FKZ: 03TN0004). Die Autoren danken dem Projektträger Jülich (PTJ) und dem Fördermittelgeber für die Unterstützung.