

Bewertung der netztechnischen Auswirkungen von Wärmepumpen in der urbanen, kommunalen Wärmeversorgung

Finnja Oestereich, Carsten Wegkamp, Eike Niehs, Henrik Wagner, Bernd Engel

elenia Institut für Hochspannungstechnik und Energiesysteme, Technische Universität Braunschweig, Schleinitzstraße 23, 38106 Braunschweig, f.oestereich@tu-braunschweig.de

Kurzfassung: Zur Reduktion der Treibhausgasemissionen im Wärmesektor gelten Wärmepumpen als wichtige Technologie, können aber zu einer zusätzlichen Belastung der Stromnetze führen. Diese Arbeit untersucht die Auswirkungen unterschiedlicher Betriebsstrategien einer Quartiers-Wärmepumpe auf den Stromnetzbetrieb. Hierzu wird die Open-Source-Modellbibliothek *eELib* um ein Wärmepumpenmodell mit temperaturabhängiger COP-Berechnung erweitert. Ebenso wird ein Quartiers-Energiemanagementsystem mit den drei Betriebsstrategien wärmegeführt, netzgeführt und preisgeführt implementiert, um diese Strategien in der Simulation eines Strom-Verteilnetzes miteinander zu vergleichen. Die Ergebnisse zeigen, dass ein netzgeführter Betrieb die Anzahl hoher Transformatorauslastungen im Vergleich zum wärmegeführten Betrieb deutlich reduziert, während die preisgeführte Strategie teilweise zu erhöhten Netzbelastungen führt. Damit werden Auswirkungen des Betriebs von Quartiers-Wärmepumpen auf die Stromnetz-Belastung aufgezeigt.

Keywords: Strom-Verteilnetze, Energiemanagement, Quartiers-Energiekonzept, Betriebsstrategien

1 Einleitung

1.1 Motivation

Der Raumwärmebedarf trägt in Deutschland maßgeblich zu den Treibhausgasemissionen bei, da die Bereitstellung von Wärme zu großen Teilen auf fossilen Energieträgern basiert [1]. Um die Ziele des Bundes-Klimaschutzgesetzes zu erreichen, ist daher die nachhaltige Umgestaltung der Wärmeversorgung unbedingt erforderlich [1]. Zentrale Ansatzpunkte der Wärmewende sind die Steigerung der Energieeffizienz und die verstärkte Integration erneuerbarer Energien [2]. Dies soll im Rahmen des Wärmeplanungsgesetzes insbesondere durch die kommunale Wärmeplanung auf Quartiersebene umgesetzt werden [3]. Dabei spielen vor allem Wärmenetze und Wärmepumpen-Technologien eine wesentliche Rolle [2,3]. Wärmepumpen (WP) ermöglichen eine Kopplung des Wärmesektors mit dem Stromsektor und stellen damit eine wichtige Schnittstelle zukünftiger Energiesysteme dar. Die großen Mengen und hohe Gleichzeitigkeit des Raumwärmebedarfs im Winter kann beim Einsatz dieser Technologie aber auch zu einem hohen elektrischen Leistungsbezug und zusätzlichen Belastungen in den Stromnetzen führen [4].

Die vorliegende Publikation adressiert diese Herausforderungen durch eine Simulation und Analyse unter Verwendung der Open-Source Modellbibliothek *eELib* [5]. Die vorhandene

Modellstruktur wird durch ein temperaturabhängiges Modell einer WP erweitert und dem Quartier-Energiemanagementsystem (DEMS, engl. district energy management system) werden Betriebsstrategien hinzugefügt, die sich auf die Regelung von WP und thermischen Energiespeichern (TES) konzentrieren. Betrachtet werden wärme-, stromnetz- und preisgeführte Strategien. Diese werden anschließend hinsichtlich ihres Einflusses auf die Stromnetzbelastung untersucht.

1.2 Stand der Forschung und Zielsetzung

Für die Dekarbonisierung des Wärmesektors können grundlegend vier technologische Ansätze zum Einsatz kommen. Die Elektrifizierung der Wärmebereitstellung kann dezentral durch WPs oder elektrische Direktheizung umgesetzt werden und zentral mit einer WP in Verbindung mit der Nutzung eines Nah- oder Fernwärmenetzes (1). Ein solches Wärmenetz kann auch direkt durch beispielsweise Abwärmenutzung, eine Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlage oder ein geothermisches Kraftwerk gespeist werden (2). Außerdem kann die Nutzung eines dekarbonisierten Gasnetzes durch den Einsatz von Energieträgern wie Wasserstoff oder synthetic natural gas in Betracht gezogen werden (3). Ergänzende Technologien wie Solarthermie und thermische Speicher sind eine weitere Möglichkeit die Emissionen der Wärmebereitstellung zu reduzieren (4). [3,6]

Viele Analysen zeigen, dass zur Umsetzung der Wärmewende verschiedene Kombination der Technologien notwendig sein werden [6]. Die beste Option für ein Quartier hängt dabei von Faktoren wie dem Dämmungsgrad der Gebäude und der Verfügbarkeit von Wärmebereitstellungsmöglichkeiten ab [7]. Eine zusammenhängende Betrachtung von Wärmebezug und -erzeugung ist dabei sehr wichtig [8].

Einige wissenschaftlichen Untersuchungen stellen heraus, dass vor allem die WP- und Wärmenetz-Technologien eine zentrale Rolle in der erfolgreichen Dekarbonisierung spielen werden [2,3]. Der Begriff Wärmenetze ist dabei als zusammenfassender Ausdruck für Fernwärme-, Nahwärme- sowie kalte Nahwärmenetze zu verstehen. Ein zentraler Vorteil der beiden Technologien ist die Möglichkeit, je nach Verfügbarkeit verschiedene Wärmequellen einsetzen zu können. Denn diese können in Kombination oder alleinstehend verwendet werden, um nachhaltige Quellen wie Luft, Wasser, Abwärme (aus industriellen Prozessen oder Abwasser), geothermische oder solarthermische Systeme einzubinden. Die WP-Technologie überzeugt dabei durch eine vergleichsweise hohe Effizienz und ist in Form der Luft-Wasser-WP weit verbreitet. [6,9]

Im Allgemeinen wird die Effizienz einer WP mit dem Coefficient of Performance (COP) angegeben. Er beschreibt das Verhältnis zwischen abgegebener Wärmeleistung Q_{ab} und benötigter elektrischer Leistung P_{el} und kann mittels Gl. 1 berechnet werden. Das Verhältnis kann dabei im idealisierten Fall durch das obere Temperaturniveau der Senke T_S (in Kelvin) und das untere Temperaturniveau der Quelle T_Q beschrieben werden [10]. Dies verdeutlicht, dass der COP einen höheren Wert annimmt, je kleiner der Temperaturunterschied zwischen Quelle und Senke ist.

$$COP = \frac{Q_{ab}}{P_{el}} = \frac{T_S}{T_S - T_Q} \quad \text{Gl. 1}$$

Zu den größten Herausforderungen der WP-Technologien zählt deswegen die verringerte Effizienz bei niedrigen Quelltemperaturen, welche zumeist die Außentemperatur ist. Eine

weitere große Herausforderung ist der Anstieg des Strom-Spitzenbedarfs. Diese Aspekte verdeutlichen, dass ein großflächiger Einsatz von WP nur in Verbindung mit einem Ausbau der Gebäudeeffizienz und der elektrischen Netzinfrastruktur realisierbar ist. Diese genannten Aspekte können einen zusätzlichen Beitrag zu dem hohen Kostenaufwand leisten, der mit einer Umstellung auf eine WP-orientierte Wärmeversorgung verbunden ist. [6,9]

Durch die erhöhte Spitzenlast des Strombedarfs kann es vor allem bei kalten Außentemperaturen, wenn die Effizienz der Wärmeerzeugung am geringsten und damit der elektrische Leistungsbedarf am höchsten ist, in den unteren Spannungsebenen des elektrischen Verteilnetzes zu Überlastungen kommen [4]. Unter anderem sind durch die Lasterhöhung mit unteren Spannungsbandverletzungen und Leitungsüberlastungen zu rechnen [4]. Die Stärke dieser Auswirkungen ist von der Technologie der WP abhängig, wobei vor allem bei Nutzung einer Luft-Wasser-WP und bei nicht modulierbaren WP ein vermehrtes Auftreten der Überlastungen zu erwarten ist [11]. Außerdem kommt es bei dezentraler, häuslicher Wärmeversorgung eher in ländlichen Regionen zu Überlastungen als in vorstädtischen Gebieten [12].

Einige Untersuchungen zeigen im Kontrast dazu, dass diese Auswirkungen durch intelligente Steuerung dezentraler WP in Verbindung mit der thermischen Trägheit des Gebäudes sowie mit passend dimensionierten thermischen Speichern, reduziert werden können [4]. In [13] wird unter Einbezug der finanziellen Ebene in einer Optimierungsstrategie zusätzlich festgestellt, dass die Lastreduzierung einer dezentralen WP ohne zusätzlichen TES mit wenig Mehrkostenaufwand für den Verbraucher verbunden ist. Das Einbinden eines TES, der zusätzlich zum Heizsystem des Hauses Energie speichert und dadurch eine größere Lastreduzierung ermöglicht, zeigt dabei einen erhöhten Mehrkostenaufwand.

In einigen Analysen konnte durch das zusätzliche Flexibilisierungspotential von WP sogar positive Auswirkungen im Rahmen von Frequenz- und Spannungshaltung erzielt werden [4]. Weiterhin bestehen Untersuchungen zum Integrieren von WP und Wärmenetzen [14] und zur Dimensionierung von WP und TES in einem integrierten System [15], aber zur Kenntnis der Autoren besteht keine konkrete Analyse der Auswirkung unterschiedlicher Betriebsstrategien einer zentralen Quartiers-WP auf den Stromnetzbetrieb. Dies führt zur offenen Forschungsfrage dieser Untersuchung: **Inwiefern unterscheiden sich die Auswirkungen verschiedener Betriebsstrategien von Quartiers-Wärmepumpen auf den Stromnetzbetrieb?**

2 Methodik

Zur Untersuchung dieser Forschungsfrage wird in diesem Kapitel die methodische Vorgehensweise vorgestellt. Dazu wird zum einen in Abschnitt 2.1 auf die Erweiterungen in der Modellierung bezüglich der für die Wärmeversorgung relevanten Modelle und Strategien eingegangen. Zum anderen wird das für die Analyse genutzte Szenario in Abschnitt 2.2 erläutert. Damit können im anschließenden Kapitel 3 die Ergebnisse diskutiert werden.

2.1 Modellierung

Die genutzte Modellbibliothek *eELib* ermöglicht die Modellierung von Prosumer Haushalten und Energiemanagementsystemen (EMS) innerhalb eines elektrischen Systems und die Anwendung von implementierten Modellen im Rahmen von Co-Simulationen. Die

Simulationsstruktur ist in Abbildung 1 schematisch dargestellt. Die Modelle des Netz-EMS und des Stromlieferanten übergeben Daten an die EMS-Modelle der Häuser (HEMS) und des Quartiers (DEMS), die abgeleitet davon Steuersignale an die Modelle der zugehörigen Betriebsmittel senden. Die Anlagenmodelle sind wiederum in Form physischer Leistungsflüsse an die Knoten des Netzes angebunden und werden in der Lastflussberechnung berücksichtigt. Ausgehend von der Berechnung können Netzzustandsdaten an das Netz-EMS gesendet werden. Über diese Verbindungen werden Informationen zwischen den Modellen ausgetauscht, bis keine Änderungen mehr vorliegen und die Berechnungen für den betreffenden Zeitschritt beendet sind. [5]

Im Rahmen dieser Ausarbeitung liegen die Erweiterungen der *eELib* hauptsächlich bei einem WP-Modell mit Temperatur-abhängiger Effizienz, der Integration eines TES und der Konzeptionierung und Umsetzung von DEMS-Betriebsstrategien.

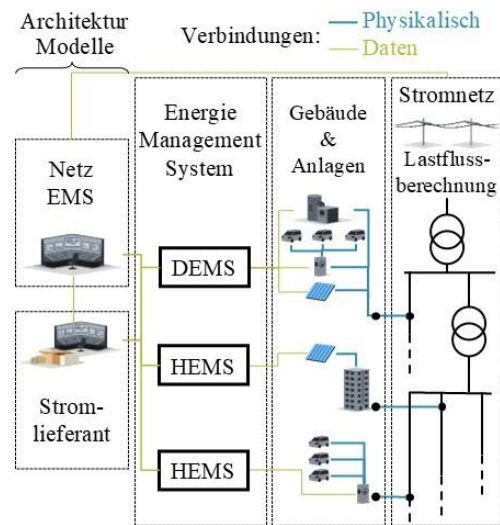


Abbildung 1: Simulationsstruktur der *eELib*, angelehnt an [5]

2.1.1 Wärmepumpe mit temperaturabhängiger Effizienz

Das erweiterte WP-Modell baut auf dem bestehenden Modell auf und fügt eine Berechnung für den COP ein, die abhängig von der Temperatur der Wärmequelle ist. Die Implementierung ist dabei vorerst auf WP mit Luft als Wärmequelle begrenzt. Für diesen Zweck wurde der *eELib* ein Modell zum Einlesen und Verwerten von Temperatur-Daten hinzugefügt (*TemperatureCSV*).

Die Berechnung des COP ist zusätzlich in Haushalts- und Quartiers-WPs unterteilt, was beim Erstellen einer Modell-Instanz als Parameter übergeben werden kann. Der COP der Haushalts-WP COP_H wird anhand von Gl. 2 berechnet, welche durch Regression von Hersteller-Daten bezüglich unterschiedlichen Temperaturen erstellt wurde [16].

$$COP_H = 6,08 - 0,09 \cdot \Delta T + 0,0005 \cdot \Delta T^2 \quad \text{Gl. 2}$$

Für den COP der Quartiers-WP COP_Q wird Gl. 3 genutzt, die ebenfalls durch Regression aus empirischen Daten abgeleitet wurde und vor allem im niedrigen COP-Bereich als gute Näherung an die Realität bewertet wird [17].

$$COP_Q = 1,448 \cdot 10^{12} \cdot (\Delta T + 2 \cdot 88,73)^{-4,946} \quad \text{Gl. 3}$$

In beiden Fällen wird vorher die Temperatur-Differenz ΔT als Differenz der Senk- und Quelltemperatur berechnet. Die Senktemperatur beschreibt die Temperatur des Heizwassers nach der Wärmeübertragung durch die WP. Nach [16] wird diese für einen Plattenheizkörper als Differenz aus einer Grundtemperatur von 40 °C und der Außentemperatur berechnet. Dadurch werden die Wärmeverluste des Gebäudes an die Umgebung berücksichtigt. Die Grundtemperatur kann bei Instanziierung des Modells ebenfalls eingestellt werden.

Anhand des COP wird dann analog zum bestehenden Modell im nächsten Schritt die aus der thermischen Leistung resultierende elektrische Leistung berechnet.

2.1.2 Modellierung eines thermischen Energiespeichers

In der Modellierung des TES wird die thermische Speicherkapazität C_{TES} nach Gl. 4 auf Basis statischer Parameter für Speichertemperatur T_{TES} und Raumtemperatur T_{Raum} sowie für das Speichervolumen V_{TES} in l bestimmt. Als Speichermedium wird Wasser mit einer spezifischen Wärmekapazität $c_{Wasser}=4,186 \frac{kJ}{kg \cdot K}$ und einer Dichte $\rho_{Wasser}=1 \frac{kg}{l}$ angenommen. Darauf aufbauend werden für jeden Zeitschritt unter Berücksichtigung von Verlust- und Effizienzparametern die zulässigen Grenzwerte des Wärmestroms für den Ein- und Ausspeichervorgang berechnet, die durch maximale Wärmestromgrenzen $Q_{max,TES}$ nach Gl. 5 begrenzt werden. Diese setzt sich aus der Speicherkapazität, der Simulationsschrittweite Δt in Sekunden und einem maximalen prozentualen Fluss r_{TES} (beispielsweise 10 % [18]) zusammen.

$$C_{TES}=V_{TES} \cdot \rho_{Wasser} \cdot c_{Wasser} \cdot (T_{TES}-T_{Raum}) \quad Gl. 4$$

$$Q_{max,TES}=C_{TES} \cdot r_{TES} \cdot \frac{\Delta t}{3600s} \quad Gl. 5$$

2.1.3 Betriebsstrategien des Quartiers-Energiemanagementsystems

Neben einer grundlegenden Betriebsstrategie, die den wärmegeführten Betrieb der WP darstellt, werden eine netzgeführte und eine preisgeführte Strategie für das DEMS entwickelt. Im Rahmen dieser Ausarbeitung liegt dabei der Fokus auf der Steuerung der thermischen Energiebereitstellung. Dementsprechend wird die gezielte Steuerung weiterer möglicher DEMS-Betriebsmittel wie Ladeinfrastruktur und Batteriespeichersysteme nicht betrachtet – bei diesen wird ein einfaches Überschussladen bzw. Laden mit maximaler Leistung angewendet.

Zur Umsetzung dieser Strategien wird eine Variable eingeführt, die angibt ob für den aktuellen Zeitschritt ein ausgeglichener, ein maximaler oder ein minimaler Leistungsbezug angestrebt wird. Die zugrundeliegende Logik für die Bestimmung der Variable ist in Abbildung 2 abgebildet. Im wärmegeführten Betrieb entspricht der angestrebte Leistungsbezug immer dem ausgeglichenen Fall.

Für die netzgeführte Strategie wird anhand von Netzauslastungsdaten entschieden, die als Signal vom Netz-EMS empfangen werden. Wenn eine untere Spannungsbandverletzung oder eine Auslastung der Betriebsmittel durch einen hohen Bedarf vorliegen, wird ein minimaler Leistungsbezug angestrebt. Der erhöhte Leistungsbezug wird hingegen ausgelöst, wenn eine obere Spannungsbandverletzung vorliegt oder eine durch viel Erzeugung geprägte Auslastungssituation besteht. Wenn keiner dieser Fälle vorliegt, wird der ausgeglichene Leistungsbezug angestrebt.

Bei der preisgeführten Strategie wird zunächst am ersten Zeitschritt eines Tages anhand der vom Strommarkt-Modell gesendeten Daten der durchschnittliche Strompreis für die nächsten 24 Stunden berechnet. Anschließend wird für jeden Zeitschritt abgeglichen, ob der jeweilige Strompreis um mehr als 20 % vom kalkulierten Durchschnitt abweicht. Wenn der Strompreis um mehr als 20 % höher ist, wird ein minimaler Leistungsbezug angestrebt und wenn er weniger als 80 % des Durchschnitts beträgt, ein maximaler Leistungsbezug.

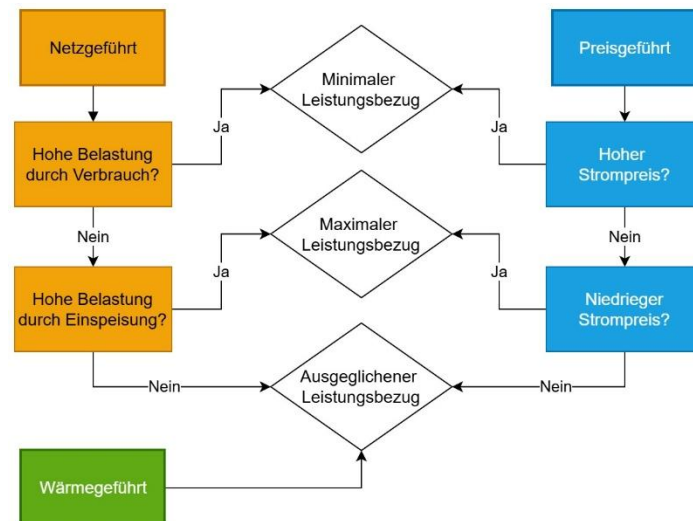


Abbildung 2: Ablaufdiagramm zur Bestimmung des WP-Leistungsbezugs in den drei DEMS-Betriebsstrategien wärmegeführt, netzgeführt und preisgeführt

Dieser Leistungsbezug-Parameter wird anschließend in der Funktion zur Bestimmung der WP-Leistung genutzt, um diese entsprechend anzupassen. Der Entscheidungsprozess dafür ist in Abbildung 3 skizziert. In dem Fall, dass ein minimaler Leistungsbezug ausgeführt werden soll, wird von dem vorhandenen Wärmebedarf Q_{Bedarf} die maximale Wärmeabgabe des TES $Q_{\text{TES,max,aus}}$ abgezogen, so dass die WP nur den Teil vom Wärmebedarf bereitstellt, der nicht vom Speicher gedeckt werden kann. Im gegensätzlichen Fall des maximalen Leistungsbezugs wird die maximale Wärmeaufnahme des TES $Q_{\text{TES,max,ein}}$ auf den Bedarf addiert. Wenn keiner der beiden Fälle besteht, wird der Betrieb für einen ausgeglichenen Leistungsbezug gefahren. Dabei wird abgefragt, ob die Auslastung der WP durch den Wärmebedarf unter 90 % liegt und falls dies zutrifft, wird auf den Wärmebedarf der mögliche Wärmezuffluss zum TES addiert. Der einzuspeichernde Wärmefluss bestimmt sich aus dem Minimum von maximaler Wärmeaufnahme des TES und maximaler zusätzlicher Wärmeabgabe der WP, so dass die Auslastung der WP maximal bei 90 % liegt. In jedem Fall

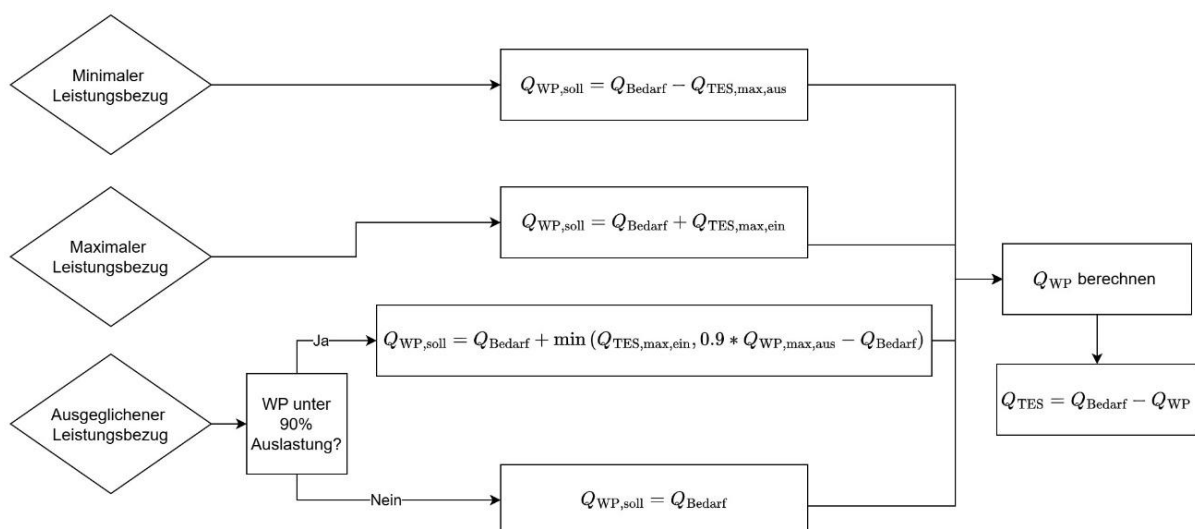


Abbildung 3: Ablaufdiagramm der thermischen Leistungsberechnung für WP und TES im DEMS

werden als nächster Schritt anhand des insgesamten Wärmebedarfs $Q_{WP,soll}$ und der im Modell festgelegten Leistungsgrenzen die thermische Leistung der WP Q_{WP} berechnet. Die Differenz des ursprünglichen Wärmebedarfs und der thermischen Bereitstellung der WP wird dann für die Berechnung der Leistungsdaten des TES Q_{TES} genutzt. So wird bei überschüssiger Bereitstellung Wärme eingespeichert und bei zu wenig Bereitstellung entsprechend Wärme in das Heizsystem abgegeben.

2.2 Szenario

Um die vorgestellten Betriebsstrategien im Zusammenhang mit der dynamischen COP-Berechnung zu untersuchen, wird ein Szenario in Form eines synthetischen Mittelspannung-Niederspannung-Netzes erstellt. Dieses ist schematisch in Abbildung 4 dargestellt. An dem Mittelspannungsring sind ein DEMS und fünf Niederspannungsnetze mit jeweils fünf Haushaltslasten angeknüpft. Die Haushalte haben unterschiedliche Lastprofile mit Jahresgrundlasten im Bereich von 20-47 MWh, welche Mehrfamilienhäuser abbilden sollen [19]. An das DEMS sind folgende Modell-Instanzen und hinterlegte Datenreihe angegliedert:

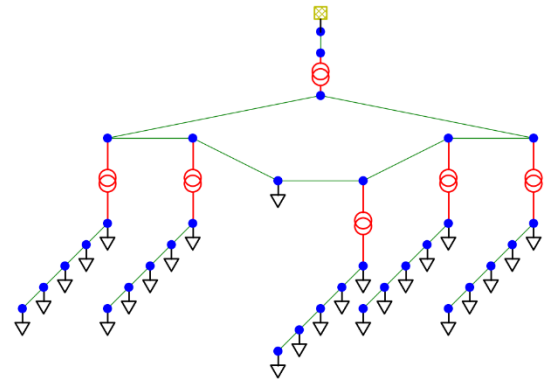


Abbildung 4: Darstellung des verwendeten Stromnetzes mit Mittelspannungs-Ring und Niederspannungs-Strängen sowie Anschluss an die Hochspannung (oben, gelb)

- Photovoltaikanlage (Erzeugungszeitreihe) mit 2 MWp Leistung, eigene Daten
- 12 E-Auto-Ladestationen mit 22 kW Leistung
- 30 E-Auto-Ladeprofile, fünf versch. Modelle mit 42-95 kWh Batteriekapazität [20]
- WP-Instanz mit 5,5 MW_{th} Leistung
- TES-Instanz mit 1260 m³ Kapazität (entspricht ca. 50 MWh)
- Wärmebedarfszeitreihe für 164 Gebäude mit insg. 19,9 GWh Jahreswärmebedarf [21]

Die Wärmebedarfszeitreihe ist synthetisch mit Standardlastprofilen erstellt worden. Für Haushalte ist die VDI-Richtlinie 4655 [22] genutzt worden und für Gewerbe-Gebäude BDEW-Lastprofile [23]. Diese Zeitreihe soll als Grundlage für die Wärmeplanung eines Mischquartiers in Braunschweig dienen. Der Wärmebedarf wurde dabei statisch um einen Faktor von 11 % [24] erhöht, um die Verluste des Wärmenetzes anhand eines Durchschnittswert zu berücksichtigen.

Für die Berechnung des COP wird eine Temperaturzeitreihe genutzt, die auf den Daten des Deutschen Wetterdienstes [25] für Braunschweig im Jahr 2018 beruht. Die genutzten Datensätze und Simulationsdateien sind vollständig veröffentlicht unter [26].

3 Ergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Simulation des vorgestellten Szenarios aufgezeigt und diskutiert. Dazu werden die beschriebenen Betriebsstrategien auf ihre erwünschte

Wirkweise überprüft, sowie die Auswirkungen dieser über den gesamten Simulationszeitraums eines Jahres untersucht und erläutert.

Die Graphen in Abbildung 5 zeigen die Wirkung der netz- und preisgeführten Betriebsstrategien innerhalb beispielhafter Zeiträume. Zum Vergleich der netzgeführten mit der wärmegeführten Strategie ist die Auslastung des Hochspannungs-Mittelspannungs-Transformators zusammen mit dem Füllstand des TES abgebildet (links). Dadurch wird deutlich, dass in Bereichen, in denen die Auslastung im wärmegeführten Fall nur wenig unterhalb von 100 % liegt, die Regelung der netzgeführten Strategie die Auslastung verringert und einen (größeren) Teil des Wärmebedarfs mit Hilfe des Speichers deckt. Auf der rechten Seite von Abbildung 5 ist die thermische Erzeugung der WP für den Fall eines preisgeführten DEMS-Betriebs im Vergleich zum wärmegeführten Betrieb abgebildet. Zusätzlich ist der Verlauf des Strompreises aufgetragen, was die Auswirkung der preisgeführten Strategie in Zeitabschnitten mit vergleichsweise hohen bzw. niedrigen Preisen verdeutlicht. Insgesamt zeigt sich sowohl für die netzgeführte als auch die preisgeführte Betriebsstrategie des DEMS, dass die erwünschten Reaktionen erzielt werden konnte.

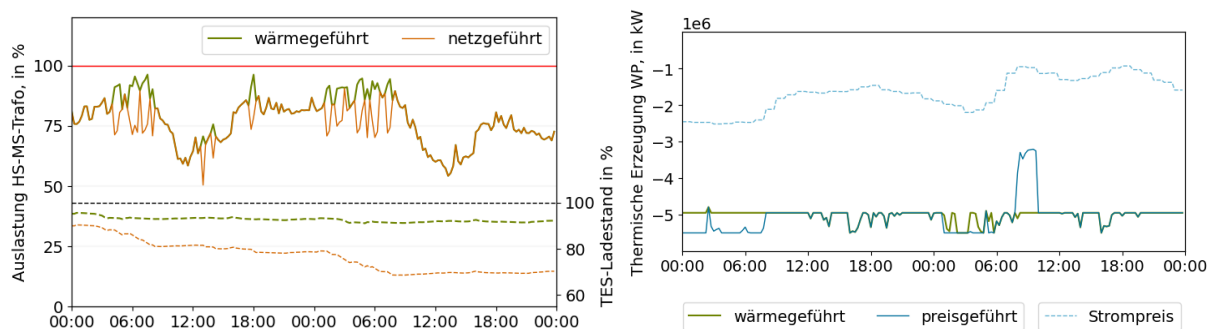


Abbildung 5: Funktionsweise der netzgeführten (l) und preisgeführten (r) Betriebsstrategien, exemplarische Simulationsergebnisse vom 8.-9. Januar bzw. 8.-9. Februar

Die Auswirkungen der Strategien für den Simulationszeitraum des gesamten Jahres sind in Abbildung 6 in Form der Transformatorauslastung (links) und in Form der aggregierten Spannungsamplituden der Niederspannungsknoten (rechts) dargestellt. Bei der Transformatorauslastung ist zu erkennen, dass die Anzahl an Auslastungen der netzgeführten Strategie im Bereich von 90-105 % signifikant abnimmt, was wie zuvor beschrieben, die erwünschte Reaktionsweise widerspiegelt. Im Bereich von 105-110 % wird ein weniger starker Rückgang deutlich und im Bereich von über 110 % Auslastung ist die Anzahl nur um einen Wert kleiner als bei der wärmegeführten Strategie. Eine mögliche Begründung dafür ist, dass die gespeicherte Wärme des TES bereits in den vorangegangenen Zeitschritten bei Auslastungen im Bereich von 90-105 % genutzt wurde und in diesen sehr kritischen Zeitschritten dann keine Flexibilität mehr zur Verfügung steht. Außerdem sind im Auslastungsbereich von 80-90 % höhere Werte für den netzgeführten DEMS-Betrieb abzulesen, was daraus resultiert, dass die erhöhte Auslastung dann auch in diesen Bereich reduziert werden kann, aber nicht unbedingt eine Reduktion bis unter 80 % Auslastung möglich ist.

Für die Spannungsamplituden (rechts) ist bezüglich der netzgeführten Betriebsstrategie im Vergleich zum wärmegeführten Betrieb insgesamt ein vermehrtes Auftreten von unteren Spannungsbandverletzungen zu erkennen. Eine Erklärung dafür ist der Umstand, dass die

WP als Last in der Modellierung kapazitive Blindleistung in das Netz einspeist und die Lastreduzierung dadurch eine spannungssenkende Wirkung hat. Verstärkt wird dieses Phänomen, wenn zu dem entsprechenden Zeitpunkt die PV-Anlage Energie erzeugt. Denn diese speist dann induktive Blindleistung in das Netz, und im Fall einer Lastreduzierung erhöht sich diese Blindleistungseinspeisung über das DEMS durch die reduzierte, kapazitive WP-Blindleistung.

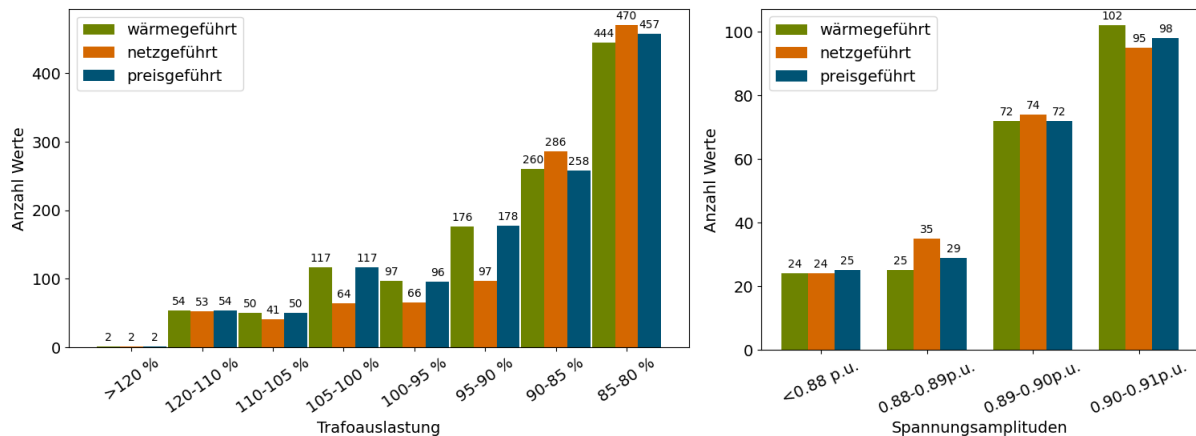


Abbildung 6: Simulationsergebnisse zur Anzahl an Zeitschritten mit höherer Auslastung für Transformator (l) und Knotenspannung (r) für eine Jahressimulation

Bei der preisgeführten Betriebsstrategie ist insgesamt eine geringere Abweichung von der wärmegeführten Strategie zu erkennen als bei der netzgeführten Strategie. Im Schnitt liegt allerdings ein vermehrtes Auftreten von Überlastungssituationen im Vergleich zum wärmegeführten Betrieb vor, was insbesondere in den Spannungswerten unter 0.89 p.u. erkennbar ist. Dies ist damit zu begründen, dass die preisgeführte Strategie ohne Kenntnis über die Netzauslastung reagiert und somit auch in Überlastungssituation eine Leistungserhöhung veranlassen kann, wenn der Preis in dem Zeitschritt entsprechend niedrig ist. Allgemein wird der Leistungsbezug in diesen Zeitschritten mit geringen Preisen gesammelt und kann so zu höherer Stromnetzbelastung führen.

4 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Ausarbeitung wurden die Auswirkungen der Wärmeversorgung durch zentrale Wärmepumpen auf Stromnetzbelastungen untersucht. Dazu wurden Modelle einer bestehenden Modellbibliothek ergänzt (Quartiers-Energiemanagement, DEMS sowie Thermischer Energiespeicher, TES) oder erweitert (Wärmepumpe, WP). Für das DEMS wurden neben einer wärmegeführten Betriebsstrategie eine netzgeführte sowie eine preisgeführte Strategie entwickelt und umgesetzt.

Für den netzgeführten Betrieb konnte im Simulationszeitraum eines Jahres im Vergleich zur wärmegeführten Strategie insgesamt eine Reduktion der Netzzustände mit einer hohen Auslastung erreicht werden. Bei der preisgeführten DEMS-Regelung steigt die Anzahl an Netzsituationen nahe bzw. über den Grenzwerten hingegen. Aus diesen Betrachtungen lässt sich ableiten, dass es sinnvoll wäre, geeignete ökonomische Anreize für einen netzdienlichen Betrieb von Quartiers-WP schaffen, um die negativen Stromnetz-Auswirkungen zu reduzieren und damit z. B. notwendigen Netzausbau zu minimieren.

Für zukünftige Untersuchungen wäre eine Betriebsstrategie denkbar, bei der Preis- und Netz-Anreize kombiniert werden. Außerdem wäre eine Regelung erstrebenswert, die auf Basis der prognostizierten Temperatur einen möglichst effizienten Betrieb der WP anvisiert, wobei die Netzauswirkungen dieser Strategie zu untersuchen wären. Für eine ganzheitliche Untersuchung der DEMS-Betriebsstrategien wären die Betriebskosten insbesondere der preisgesteuerten Strategie auszuwerten und den anderen Strategien gegenüberzustellen. Für weiterführende Analysen wären darüber hinaus Modellerweiterungen und realitätsnahe Datensätze und Netzmodelle sinnvoll, wobei die vorliegenden Untersuchungen darauf ausgelegt sind, die Funktionsfähigkeit aufzuzeigen und grundlegende Zusammenhänge zu verdeutlichen. Erweiterungen können in der thermischen Modellierung liegen, z. B. hinsichtlich der Wärmenetzverluste oder der thermischen Trägheit von Wärmenetzen und Gebäuden. Außerdem wäre auch die Modellierung weiterer Wärmequellen für die WP interessant, ebenso wie eine optimierte Auslegung der WP und des TES zur Untersuchung des Einflusses auf die Flexibilisierung im Betrieb und etwaigen Stromnetzauswirkungen für die Betriebsstrategien.

5 Danksagung

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Die vorliegenden Erkenntnisse wurden im Rahmen des BMW-geförderten Verbundvorhabens „Connect2Transform“ (Förderkennzeichen 03EN31058) erarbeitet. Die Autor:innen danken dem BMW für die finanzielle Unterstützung. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autor:innen und spiegelt nicht notwendigerweise die Meinung des Projektkonsortiums C2T wider.

6 Referenzen

- [1] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), *Dialog Klimaneutrale Wärme 2025 – Ergebnispapier*.
- [2] S. Paardekooper et al., "Heat Roadmap Germany: Quantifying the Impact of Low-Carbon Heating and Cooling Roadmaps," Aalborg University. Zugriff am: 1. Februar 2026. [Online]. Verfügbar unter: heatroadmap.eu/roadmaps/
- [3] C. Reicher et al., Hg. *Handbuch Nachhaltige Energiesysteme im Quartier: Modelle und Strategien zwischen lokalen und globalen Herausforderungen*. Wiesbaden: Springer Vieweg; Springer Fachmedien Wiesbaden, 2025.
- [4] N. Damianakis, G. R. C. Mouli und P. Bauer, "Grid impact of photovoltaics, electric vehicles and heat pumps on distribution grids — An overview," *Applied Energy*, Jg. 380, S. 125000, 2025, doi: 10.1016/j.apenergy.2024.125000.
- [5] C. Wegkamp et al., "eELib: Open-Source Model Library for Prosumer Power Systems and Energy Management Strategies," S. 1–6, doi: 10.1109/OSMSES62085.2024.10668964.
- [6] Abbasi et al., Mohammad Hosein, "Heat transition in the European building sector: Overview of the heat decarbonisation practices through heat pump technology," *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, Jg. 48, S. 101630, 2021, doi: 10.1016/j.seta.2021.101630.
- [7] C. Ayasse, J. Barbosa und F. Steinke, "Optimal decarbonization of urban heating systems considering interdependencies between building retrofits and heat supplies," *Energy*, Jg. 338, S. 138628, 2025, doi: 10.1016/j.energy.2025.138628.

- [8] K. Vilén, S. Selvakkumaran und E. O. Ahlgren, "Communal or individual – Exploring cost-efficient heating of new city-level housing in a systems perspective," *Smart Energy*, Jg. 10, S. 100097, 2023, doi: 10.1016/j.segy.2023.100097.
- [9] A. S. Gaur, D. Z. Fitiwi und J. Curtis, "Heat pumps and our low-carbon future: A comprehensive review," *Energy Research & Social Science*, Jg. 71, S. 101764, 2021, doi: 10.1016/j.erss.2020.101764.
- [10] K. Langeheinecke et al., Hg. *Thermodynamik für Ingenieure*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2025.
- [11] R. Dijkstra, "Grid Impact of Different Types of Heat Pumps: A Case Study on Transformer Overloading and Undervoltage Problems on a Dutch Low-Voltage Grid," Masterarbeit, Delft University of Technology, 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://resolver.tudelft.nl/uuid:7e773dbb-3dac-4185-b27b-7c3f547960b4>
- [12] N. Belonogova et al., "GRID IMPACT OF HEAT PUMP INTEGRATION IN THE RESIDENTIAL SECTOR," *IET Conf. Proc.*, Jg. 2021, Nr. 6, S. 2641–2645, 2021, doi: 10.1049/icp.2021.2204.
- [13] B. Baeten, F. Rogiers und L. Helsen, "Reduction of heat pump induced peak electricity use and required generation capacity through thermal energy storage and demand response," *Applied Energy*, Jg. 195, S. 184–195, 2017, doi: 10.1016/j.apenergy.2017.03.055.
- [14] S. Klyapovskiy et al., "Integrated Planning of a Large-Scale Heat Pump in View of Heat and Power Networks," *IEEE Trans. on Ind. Applicat.*, Jg. 55, Nr. 1, S. 5–15, 2019, doi: 10.1109/TIA.2018.2864114.
- [15] S. Siddiqui, J. Macadam und M. Barrett, "The operation of district heating with heat pumps and thermal energy storage in a zero-emission scenario," *Energy Reports*, Jg. 7, S. 176–183, 2021, doi: 10.1016/j.egyr.2021.08.157.
- [16] O. Ruhnau, L. Hirth und A. Praktiknjo, "Time series of heat demand and heat pump efficiency for energy system modeling," *Scientific data*, Early Access. doi: 10.1038/s41597-019-0199-y.
- [17] M. Jesper et al., "Large-scale heat pumps: Uptake and performance modelling of market-available devices," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Jg. 137, S. 110646, 2021, doi: 10.1016/j.rser.2020.110646.
- [18] D. Romanchenko et al., "Thermal energy storage in district heating: Centralised storage vs. storage in thermal inertia of buildings," *Energy Conversion and Management*, Jg. 162, S. 26–38, 2018, doi: 10.1016/j.enconman.2018.01.068.
- [19] M. Schlemminger et al., *WPuQ*. Zenodo, doi: 10.5281/zenodo.5642902.
- [20] C. Gaete-Morales et al., "An open tool for creating battery-electric vehicle time series from empirical data, emobpy," *Scientific data*, Nr. 8, 2021, doi: 10.1038/s41597-021-00932-9.
- [21] Joris Zimmermann, *lpagg: Load profile aggregator for building simulations*. Zugriff am: 5. Februar 2026. [Online]. Verfügbar unter: <https://github.com/jnnettels/lpagg>
- [22] VDI, *VDI 4655:2008-05 Referenzlastprofile von Ein- und Mehrfamilienhäusern für den Einsatz von KWK-Anlagen*.
- [23] Mark Hellwig, "Entwicklung und Anwendung parametrisierter Standard-Lastprofile," Dissertation, Institut für Energietechnik, TU München, 2003. [Online]. Verfügbar unter: <mediatum.ub.tum.de/doc/601557/601557.pdf>
- [24] Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e.V., "AGFW Hauptbericht 2023," 2024. Zugriff am: 1. Februar 2026. [Online]. Verfügbar unter: www.agfw.de/zahlen-und-statistiken/agfw-hauptbericht
- [25] Deutscher Wetterdienst. Zugriff am: 1. Februar 2026. [Online.] Verfügbar: https://www.dwd.de/DE/leistungen/cdc/cdc_ueberblick-klimadaten.html
- [26] F. Oestereich et al., *Bewertung der netztechnischen Auswirkungen von Wärmepumpen in der urbanen, kommunalen Wärmeversorgung (data)*, 19. Symposium Energieinnovation 2026 (EnInnov), Graz, Austria. Zenodo, doi: 10.5281/zenodo.18481661.