

Analyse des Wärmepumpenverhaltens zur Erweiterung eines Verteilnetzplanungswerkzeugs

Dennis Kötter, André Seack und Jan Kays

Institut für Energiesysteme, Energieeffizienz und Energiewirtschaft
Technische Universität Dortmund
Dortmund, Deutschland
dennis.koetter@tu-dortmund.de

Kurzfassung—Die Herausforderungen in der Energieversorgung, wie die Zunahme dezentraler Energieumwandlungsanlagen und flexiblere Lasten, erfordern eine Berücksichtigung bei der Planung und Optimierung von Verteilnetzen. Für eine effiziente Bewertung der Verteilnetze sind daher Anpassungen der Planungsverfahren notwendig. Eine Möglichkeit stellt die agentenbasierte Simulation der Verteilnetze mit den dort vorhandenen Netzteilnehmern dar. Jeder Netzteilnehmer wird in Form eines einzelnen Agenten abgebildet und das Zusammenwirken aller Agenten bildet ein Multiagentensystem. In diesem Beitrag wird zur Ergänzung einer bereits vorhandenen Simulationsumgebung ein Agent zur Modellierung von Wärmepumpen entwickelt. Abschließend erfolgt eine Simulation, in der die Auswirkungen von Wärmepumpen auf ein exemplarisches Niederspannungsnetz dargestellt werden.

Keywords: Verteilnetzplanung; Multiagentensystem; Wärmepumpe;

I. EINLEITUNG

Seit mittlerweile über 40 Jahren spielt die Wärmepumpe eine variierende Rolle in der Heizungstechnik. Die ersten Anlagen konnten nicht durch ihre Effizienz überzeugen, sodass der erste Wärmepumpen-Boom ein schnelles Ende fand. Aufgrund von neuen gesetzlichen Rahmenbedingungen, welche die Nutzung regenerativer Energien empfehlen, erfährt der Wärmepumpenmarkt seit ca. zehn Jahren ein starkes Wachstum [1]. Durch die hohe Anlagenleistung haben Wärmepumpenanlagen einen signifikanten Einfluss auf die Belastung der Niederspannungsnetze. Insbesondere in Neubaugebieten, in denen viele Häuser die Wärmepumpentechnologie nutzen könnten, ist eine Berücksichtigung im Netzplanungsprozess sinnvoll.

Dieser Wandel in der Wärmeenergieversorgung, der steigende Anteil von Elektromobilität und die starke Zunahme an dezentralen Einspeisern stellen für die Verteilnetzbetreiber eine Herausforderung bei der Bewertung der Leistungsfähigkeit der Netze dar. Mit den Standardplanungsverfahren kann das Verhalten flexiblerer und intelligenter Lasten, wie beispielsweise Wärmepumpen, sowie deren Interdependenzen von Umwelteinflüssen nicht angemessen berücksichtigt werden. Dort wird lediglich zu

Spitzenlastzeiten eine pauschalisierte Annahme über die zu erwartende elektrische Last getroffen. Deshalb ist es von großer Bedeutung, eine möglichst genaue Prognose der bevorstehenden Netzbelastung abgeben zu können, um so den Netzausbau zu optimieren. Somit werden neue Verfahren zur Planung von Verteilnetzen benötigt. Eine Möglichkeit stellt die agentenbasierte Modellierung dar.

In diesem Beitrag wird eine bestehende Simulationsumgebung auf Basis eines Multiagentensystems erweitert. Mit dem Multiagentensystem ist es möglich, die Einflüsse jeglicher Netzteilnehmer auf ein Verteilnetz zu modellieren und dabei auch deren Interaktionen zu berücksichtigen. Das Ergebnis der Simulationsumgebung sind Zeitreihen, mit denen eine detailliertere Kenntnis über die im analysierten Netzgebiet auftretenden Belastungen ermöglicht wird. Die Eigenschaft der Modularität von Multiagentensystemen ermöglicht die einfache Ergänzung der Simulationsumgebung mit weiteren Netzteilnehmern. Im Folgenden wird die Entwicklung eines Agenten, der das Verhalten einer Wärmepumpe abbildet, beschrieben. Dazu werden zunächst die Grundlagen der Wärmepumpentechnologie erarbeitet, woraufhin in Abschnitt III auf die agentenbasierte Modellierung von Wärmepumpen in der Simulationsumgebung eingegangen wird. Abschließend wird in einem exemplarischen Niederspannungsnetz ein Szenariorahmen mit unterschiedlichen Durchdringungsszenarien von Wärmepumpen definiert und deren Einfluss auf die Netzbelastung mit Hilfe der entwickelten Simulationsumgebung analysiert.

II. GRUNDLAGEN DER WÄRMEPUMPENTECHNOLOGIE

Eine Wärmepumpe (WP) ist ein Gerät, das einer definierten Quelle Wärme entzieht und diese Wärme an anderer Stelle wieder abgibt. Dabei wird die Wärme eines tieferen Temperaturniveaus auf ein höheres Temperaturniveau gewandelt. Für diesen Transfer von thermischer Energie wird elektrische Energie für den Betrieb eines Pumpsystems benötigt. Im Folgenden werden auf Basis von [2] und [3] die Grundlagen der Wärmepumpentechnologie vorgestellt.

A. Aufbau und Funktionsweise

Der grundlegende Aufbau einer WP mit dem dazugehörigen Energietransfer ist in Abbildung 1 dargestellt. Eine WP besteht grundsätzlich aus vier wesentlichen Komponenten, einem Verdampfer für die Entnahme der thermischen Energie der Wärmequelle, einem elektrisch angetriebenen Verdichter, einem Kondensator für die Abgabe der thermischen Energie und einem Expansionsventil. Der thermische Prozess wird als Carnot-Kreisprozess bezeichnet. Die wichtigste Voraussetzung für den Betrieb einer WP ist eine geeignete Wärmequelle. Als Wärmequelle kommen zum Beispiel Grundwasser, Erdwärme oder auch Umgebungsluft in Frage. Der Energietransferpfad in der Mitte der Abbildung verdeutlicht die Herkunft der thermischen Energie auf der Ausgangsseite. Bei der Beheizung eines Gebäudes mit einer WP werden bis zu 80 % der Energie aus der Umwelt bezogen. Die Effizienz der Anlage ist dabei von vielen Faktoren abhängig.

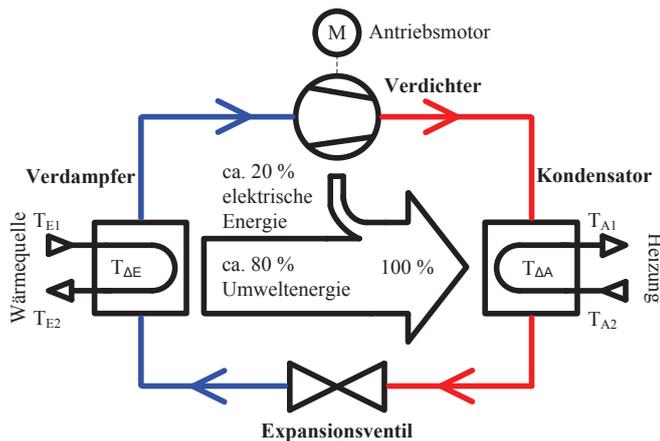


Abbildung 1 Funktionsschema der Wärmepumpe nach [3]

Für die folgende Beschreibung wird die Eingangstemperatur als T_{E1} definiert. Dies ist die Temperatur die von der Wärmequelle zur Verfügung gestellt wird. Nachfolgend wird als Wärmequelle das Grundwasser betrachtet. Der gesamte Kreislauf wird von einem Kältemittel durchströmt, das an den verschiedenen Stationen seinen Aggregatzustand ändert und somit die Funktion der WP ermöglicht. Dieses Kältemittel ist ein speziell für den Einsatz in Wärmepumpen entwickeltes Fluid. Ausgangspunkt des Kreisprozesses ist die Wärmequelle. Das Grundwasser fließt in den Verdampfer und gibt dort Wärme ab. Aufgrund der Wärmeabgabe ändert sich der Aggregatzustand des Kältemittels von flüssig zu gasförmig. Das Grundwasser kühlt sich um die Temperaturdifferenz der Eingangsseite $T_{\Delta E}$ ab und wird wieder dem Erdreich zugeführt. Das entstandene Gas wird dann von dem Verdichter angesaugt und verdichtet. Bei dieser Verdichtung wird der Druck um ein vielfaches erhöht, dadurch findet ein Temperaturanstieg des Gases statt. Gleichzeitig pumpt der Verdichter das Kältemittel durch das Rohrsystem weiter zum Kondensator. Hier wird Wärme an einen Heizkreislauf abgegeben und kann somit zum Beispiel für eine Fußbodenheizung verwendet werden. Im Kondensator findet eine weitere Aggregatzustandsänderung statt, das Kältemittel geht vom gasförmigen in den flüssigen Zustand über. Die

Temperatur des Kältemittels sinkt um die Temperaturdifferenz $T_{\Delta A}$ der Ausgangsseite. Über ein Expansionsventil expandiert das Kältemittel und fließt zurück zum Verdampfer. Dieses Ventil ist von großer Bedeutung, da es einerseits den Druck reduziert und somit eine Abkühlung des Kältemittels bewirkt und andererseits den hohen vom Verdichter erzeugten Druck auf der Kondensatorseite aufrechterhält.

B. Wärmepumpensysteme

Es gibt verschiedene Arten von Wärmepumpen, die nach Art ihrer Wärmequelle kategorisiert werden. Je nach Wärmequelle ergibt sich ein anderer Wirkungsgrad η , der nach Leistungszahl (COP) genannt wird. Zur Analyse der Effizienz wird häufig auch die Jahresarbeitszahl (JAZ) herangezogen. In der JAZ wird die gesamte Wärmepumpenanlage berücksichtigt und es werden die Betriebsdaten eines gesamten Jahres ausgewertet. Sie gibt das Verhältnis zwischen der benötigten elektrischen Leistung und der Heizleistung an.

Als erdgekoppelte Wärmepumpensysteme werden Anlagen bezeichnet, die ihre Wärme aus dem Erdreich beziehen. Bei der Erschließung der Wärmequelle kommen im Wesentlichen zwei unterschiedliche Möglichkeiten in Frage. Zum einen die Nutzung eines Brunnensystems und zum anderen die direkte Nutzung von Erdwärme. Eine Anlage mit der Wärmequelle Grundwasser, wird als Wasser-Wasser-Wärmepumpe bezeichnet. Es handelt sich dabei um eine hydrothermale Energiegewinnung. Diese Art der Wärmepumpenanlage hat den höchsten Wirkungsgrad η . Zur Erschließung der Wärmequelle wird ein Brunnensystem benötigt, das aus einem Entnahme und einem Schluckbrunnen besteht.

Die Wärmepumpensysteme, welche direkt die Erdwärme nutzen, werden als Sole-Wasser-Wärmepumpenanlage bezeichnet. Diese Art der Energienutzung wird als geothermische Energiegewinnung klassifiziert. Die Realisierung geschieht über einen geschlossenen Fluidkreislauf in der Erde. Dabei wird als Wärmeträgerfluid häufig ein als Sole bezeichnetes Wasser-Glykol-Gemisch verwendet, wodurch ein Einfrieren im Verdampfer der WP verhindert wird. Die Erschließung dieser Wärmequelle kann entweder mittels Erdsonden oder mithilfe von Erdkollektoren geschehen. Als Erdsonde wird ein Rohrsystem bezeichnet, das nahezu senkrecht in die Erde eingelassen wird. Als Erdkollektoren werden horizontal in die Erde verlegte Rohre bezeichnet.

Neben den zwei zuvor beschriebenen Wärmepumpenkonzepten, die ihre Wärme aus dem Grundwasser oder dem Erdreich beziehen, wird häufig auch die Außenluft als Wärmequelle genutzt. Bei der Erschließung der Wärmequelle werden nur geringe Kosten verursacht, da lediglich große Luftkanäle zur Verfügung gestellt werden müssen. Es handelt sich hier um eine aerothermische Energiegewinnung. Ein Negativpunkt bei den Luft-Wasser-Wärmepumpenanlagen besteht darin, dass sie im Winter, also in der Kernheizperiode, die geringste thermische Transferleistung haben. Mit sinkender Außentemperatur nehmen sowohl Leistung als auch der Wirkungsgrad η ab, da der zu überwindende Temperaturhub T_{EA} immer größer wird. Somit ist häufig sogar eine Zusatzheizung erforderlich, um den benötigten Wärmebedarf decken zu können, wodurch der gesamte Wirkungsgrad weiter reduziert wird. In der

Übergangszeit hingegen wird oft ein höherer Wirkungsgrad im Vergleich zu Sole-Wasser-Wärmepumpenanlagen erzielt. Welches System sich für ein Gebäude am besten eignet, ergibt sich zum einen aus den geographischen Gegebenheiten des Grundstücks und zum anderen aus dem benötigten Heizwärmebedarf.

III. AGENTENBASIERTE MODELLIERUNG VON WÄRMEPUMPEN

Im Rahmen dieses Beitrags wird ein Agent entwickelt, der das Verhalten von Wärmepumpenanlagen nachbildet und somit die Möglichkeit bietet, ihr Lastverhalten aus Sicht des Verteilnetzbetreibers analysieren zu können. Dieser Agent soll eine bereits vorhandene Simulationsumgebung [6] auf Basis eines Multiagentensystems erweitern. Mit dieser Simulationsumgebung werden Zeitreihen generiert, die die Analyse der Auswirkungen unterschiedlicher Netzteilnehmer in realen Verteilnetzstrukturen ermöglichen. Zunächst wird das vorhandene Multiagentensystem (MAS) kurz beschrieben, um daraufhin die Integration des Wärmepumpenagenten zu erläutern. Im Anschluss wird der entwickelte Wärmepumpenagent vorgestellt, und anhand seines Funktionsdiagramms auf die Details der Umsetzung eingegangen.

A. Das bestehende System

Das vorhandene MAS enthält bereits die Agenten, die für die Netzmodellierung von wesentlicher Bedeutung sind. Neben den Agenten für Lasten und dezentrale Energieumwandlungsanlagen, wie Photovoltaik- oder Windenergieanlagen, werden dabei auch Umweltgrößen, die, wie das Wetter oder der Marktpreis, nicht unmittelbar beeinflusst werden können, über Agenten den Netzteilnehmern zur Verfügung gestellt. Im Netzagenten, in dem eine komplexe Leistungsflussberechnung stattfindet, werden die aus dem komplexen Zusammenspiel der Netzteilnehmer resultierenden Knotenspannungen und Netzbelastungen berechnet. Um den Detailgrad der Modellierung zu steigern, sind bereits weitere Agenten entworfen worden, die neuartige Netzteilnehmer, wie Batteriespeichersysteme oder Elektrofahrzeuge mit individuellen Zielfunktionen und Verhaltensweisen berücksichtigen können.

B. Der Wärmepumpenagent

Das Ziel des Wärmepumpenagenten ist es, das Verhalten einer real existierenden Wärmepumpenanlage möglichst genau abzubilden, um den daraus resultierenden Einfluss auf die Netzbelastung realistisch nachzubilden. Der Wärmepumpenagent modelliert unter Berücksichtigung von lokalen Rahmenbedingungen wie Gebäudeeigenschaften und der Außentemperatur das zu erwartende Heizverhalten der einzelnen Anschlussnehmer. Somit kann eine relativ genaue Prognose des zu erwartenden elektrischen Leistungsbedarfs getroffen werden.

1) Definition der Ein- und Ausgangsgrößen

Jede WP erhält ihren eigenen Agenten, wodurch es ermöglicht wird, anlagenspezifische Daten zu verarbeiten. Damit der Wärmepumpenagent mit den anderen bestehenden Agenten interagieren kann, müssen die relevanten Ein- und

Ausgangsparameter des Agenten definiert werden. In Abbildung 2 wird die Integration des Wärmepumpenagenten in das bestehende MAS sowie die verwendeten Parameter graphisch aufgezeigt und im Folgenden erläutert. Der Wärmepumpenagent bezieht während der einmaligen Initialisierungsphase aus der Setup-Datenbank wichtige statische Informationen für seine Berechnungen, die sich während der Simulation nicht ändern. Da die Wirkungsweise einer WP im Wesentlichen von statischen gebäudespezifischen Daten abhängig ist, werden diese in der Datenbank hinterlegt. Diese Gebäudedaten enthalten die geographische Lage des Anschlusspunkts in Form des Längengrades λ und des Breitengrades φ , sowie die Transmissionswärmeverluste H_T und die wirksame Wärmespeicherfähigkeit E_{wirk} des Modellgebäudes. Auch die Kenndaten der Wärmepumpen, also die Heizleistung P_H , die Wirkleistung $P_{e,N}$ und der Leistungsfaktor $\cos\varphi$ werden mit den Gebäudedaten übergeben.

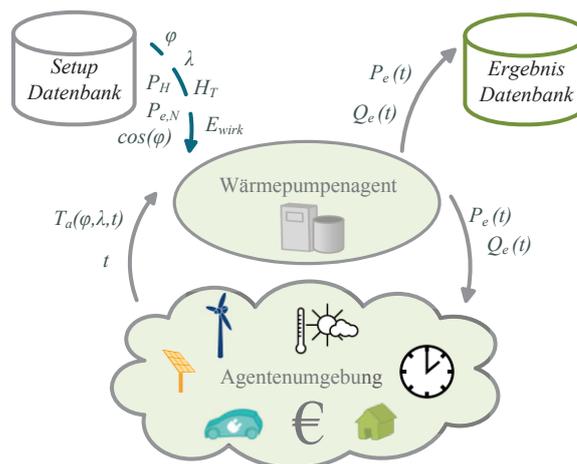


Abbildung 2 Integration des Wärmepumpenagenten nach [7]

Damit der Agent seine Berechnungen starten kann, benötigt er noch dynamische Parameter. Diese bezieht er von den anderen Akteuren des MAS. Dabei handelt es sich um den aktuellen Zeitschritt t (Zeitagent) und die aktuelle Außentemperatur T_a (Wetteragent) in Abhängigkeit der geographischen Lage des Anschlussknotens. Sind die Parameter übergeben und alle Berechnungen abgeschlossen, teilt der Wärmepumpenagent seine Ergebnisse für die Wirkleistung $P_e(t)$ und die Blindleistung $Q_e(t)$ dem Knotenagenten mit. Anschließend speichert er diese in einer Ergebnisdatenbank ab, damit sie zu einem späteren Zeitpunkt analysiert werden können. Diese Prozesse werden zyklisch durchgeführt und sind durch graue Pfeile gekennzeichnet.

2) Ablauf innerhalb des Agenten

Anhand des in

Abbildung 3 gezeigten Funktionsdiagramms wird der Ablauf des Wärmepumpenagenten während der Simulation nachfolgend näher erläutert. In der Initialisierungsphase erhält der Wärmepumpenagent die für seine Berechnungen relevanten statischen Informationen (s.o.). Weiterhin wird für den Initialisierungszeitschritt die Innentemperatur T_i des Gebäudes zufällig generiert und erhält einen Startwert zwischen $18\text{ }^\circ\text{C}$

und 22 °C, im weiteren Verlauf der Simulation ist die Innentemperatur aus dem vorherigen Zeitschritt bekannt.

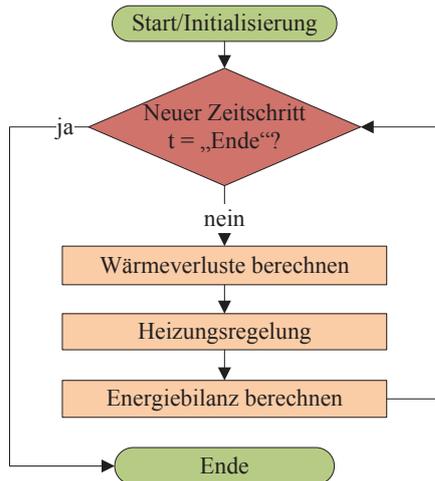


Abbildung 3 Funktionsdiagramm des Wärmepumpenagenten

Um eine möglichst realitätsnahe Abbildung des Wärmepumpenverhaltens zu erreichen, wurden für die Modellierung verschiedene Modellgebäude definiert. Die Modellgebäude wurden anhand verschiedener Energieverordnungen erstellt und dienen der Abbildung von Bestandsgebäuden in denen Wärmepumpenanlagen installiert sind. Insgesamt gibt es drei Modellgebäude, ein KfW Effizienzhaus 85, ein Neubau nach EnEV 2009 und ein Mehrfamilienhaus nach der Wärmeschutzverordnung 1995. Die Modellgebäude erfüllen somit unterschiedliche Energieeffizienzstandards, worin auch das wesentliche Unterscheidungsmerkmal liegt.

Nach der Initialisierungsphase beginnt der Wärmepumpenagent mit einem zyklischen Verhalten, das sich in verschiedene Teilschritte aufteilt. Zunächst erhält der Wärmepumpenagent den aktuellen Zeitschritt t vom Zeitagenten, wodurch die Berechnungen für diesen Zeitschritt gestartet werden. Am Ende des Simulationszeitraums wird der Agent beendet.

Damit die Wärmeverluste des betrachteten Gebäudes ermittelt werden können, wird zunächst eine Temperaturdifferenz ΔT berechnet:

$$\Delta T(t) = T_i(t) - T_a(t) \quad (1)$$

Dieses ΔT ist notwendig, um die Wärmeverluste in Abhängigkeit der Temperatur bestimmen zu können. Ein Großteil der Wärme eines Gebäudes geht über die Transmissionsverluste verloren. Die Lüftungs- und die Infiltrationsverluste werden bei der Berechnung nicht berücksichtigt. Um die Transmissionswärmeverluste eines Bauwerks bestimmen zu können, wird der temperaturspezifische Transmissionswärmeverlust H_T benötigt. Dieser kann nach [8] berechnet werden. Mit ΔT und H_T können dann die Transmissionswärmeverluste θ_T für den aktuellen Zeitschritt berechnet werden.

$$\theta_T(t) = H_T \cdot \Delta T(t) \cdot \Delta t \quad (2)$$

Der nächste Prozess des Programmablaufs ist die Heizungsregelung. Hier wird bestimmt, ob das Gebäude beheizt werden soll und somit die WP eingeschaltet wird oder nicht. Die Regelung ist, unter Berücksichtigung gängiger Betriebspraxis, als Zweipunktregelung realisiert und arbeitet mithilfe der zwei zuvor definierten Temperaturgrenzen T_u und T_o . Wird die untere Grenze T_u unterschritten, schaltet sich die WP ein und es wird dem Gebäude Wärme zugeführt. Sobald die Heizungsanlage aktiviert wurde, bleibt diese für Δt in Betrieb und führt dem Gebäude Wärme zu. Falls die obere Temperaturgrenze T_o nach einem Zeitschritt noch nicht erreicht wurde, soll auch im nächsten Zeitschritt die WP eingeschaltet werden. Liegt die aktuelle Innentemperatur T_i zu Beginn eines Zeitschritts über der unteren Grenze T_u dann bleibt die WP ausgeschaltet. Somit wird dem Gebäude keine Wärmeenergie zugeführt, und auch keine elektrische Leistung aus dem Netz bezogen.

Im nächsten Block des Funktionsdiagramms wird eine Bilanzierung der zugeführten Wärmemenge θ_H und der Wärmeverluste θ_T durchgeführt. In Abhängigkeit des Heizverhaltens ist die Energiebilanz θ_G positiv oder negativ. Bei einer positiven Energiebilanz wird die Innentemperatur T_i ansteigen und demzufolge bei einer negativen sinken.

$$\theta_G(t) = \theta_H(t) - \theta_T(t) \quad (3)$$

Um eine Aussage über die Veränderung von T_i treffen zu können, muss von der Energiebilanz auf eine Temperatur geschlossen werden. Dies wird mittels der wirksamen Wärmespeicherkapazität E_{wirik} erreicht. Sie sagt aus, wie viel Energie benötigt wird, um das Gebäude um 1 °C zu erwärmen, und berücksichtigt nur den Teil der Wärmekapazität, der einen Einfluss auf den Heizenergiebedarf hat [5]. Die Temperaturänderung wird T_{Diff} bezeichnet. Die neue Innentemperatur T_i berechnet sich dann aus der Addition der anfänglichen Innentemperatur T_i und T_{Diff} .

$$T_{Diff}(t) = \frac{\theta_G(t)}{E_{wirik}} \quad (4)$$

$$T_i(t) = T_i(t-1) + T_{Diff}(t) \quad (5)$$

Diese neue Innentemperatur ist wichtig für die Berechnungen nachfolgender Zeitschritte und steht als interne Speichervariable zur Verfügung. Zum Abschluss eines Zeitschritts werden $P_e(t)$ und $Q_e(t)$ in einer Datenbank abgelegt und den Agenten im Simulationssystem zur Verfügung gestellt, die Information über den aktuellen Leistungsbezug benötigen.

IV. SIMULATION DES AGENTENSYSTEMS

Im Folgenden werden die Auswirkungen beim Einsatz von Wärmepumpen auf die Auslastung in einem Niederspannungsnetz analysiert. Zunächst wird der entworfene Wärmepumpenagent anhand einer Zeitreihe für eine einzelne WP validiert. Daraufhin wird neben dem ausgewählten Beispielnetz der Szenariorahmen definiert. In den definierten Szenarien werden die Ergebnisse der Simulationen, Zeitreihen für die Belastung von Betriebsmitteln und Knotenspannungen

analysiert. Diese Zeitreihen umfassen jeweils einen Zeitraum von einer Woche, mit einem Zeitschrittintervall Δt von einer Stunde. Mithilfe der Simulationsergebnisse sind die Auswirkungen auf das Beispielnetz bei einem Zubau von Wärmepumpen mit unterschiedlichen Durchdringungsgraden bewertbar.

A. Betrieb einer einzelnen Wärmepumpe

Zur Validierung der Funktionalität des Agenten wird die WP eines Mehrfamilienhauses gewählt. Es handelt sich dabei um eine Sole-Wasser-Wärmepumpe. Die Wirkleistung $P_{e,N}$ der eingeschalteten WP beträgt rund 7 kW. In Abbildung 4 ist die Innentemperatur T_i des Modellgebäudes (rot) und die Zeiträume mit eingeschalteter WP (grau) für einen Tag dargestellt. Es ist zu erkennen, dass bei Unterschreitung der unteren Temperaturgrenze T_u von 19,5 °C, die WP eingeschaltet und somit die benötigte Leistung aus dem Netz bezogen wird.

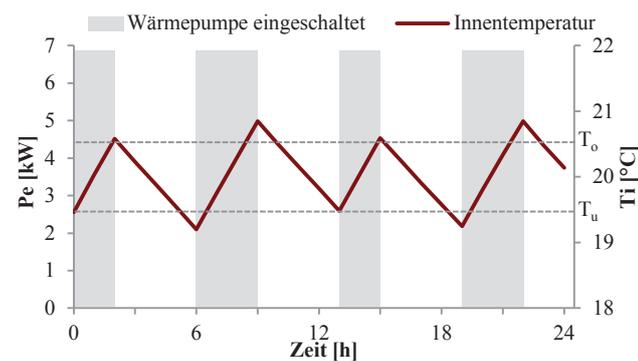


Abbildung 4 Zeitreihe der Wärmepumpe des Mehrfamilienhauses

Weiterhin ist zu erkennen, dass solange geheizt wird, bis die obere Temperaturgrenze T_o von 20,5 °C erreicht ist. Es ist in manchen Zeitschritten ein Überschwingen zu erkennen. Diese Temperaturspitzen oberhalb von T_o resultieren daraus, dass die WP das Gebäude einen vollständigen Zeitschritt beheizt und nicht sofort bei Erreichen von T_o abschaltet. Dadurch kann die Temperatur T_i bis >21 °C ansteigen, und zwar dann, wenn im vorherigen Zeitschritt nur wenige Zehntel Grade bis zum Erreichen von T_o fehlten. Die Werte von T_u und T_o können nach Belieben variiert werden.

Anhand dieses Beispiels wird deutlich, dass die Regelung funktioniert und ein eingestelltes Raumklima garantiert werden kann.

B. Szenariorahmen

Als Beispielnetz für die nachfolgenden Simulationen wurde ein Niederspannungsnetz aus dem Raum Münsterland gewählt. Der Simulationszeitraum umfasst die erste Januarwoche des Jahres 2011, beginnend am 1. Januar um 0 Uhr. Weiterhin wird für eine bessere Vergleichbarkeit der nachfolgenden Simulationsszenarien ein Basisszenario festgelegt. Das Basisszenario beschreibt das Netzverhalten ohne installierte Wärmepumpen.

In Szenario 1 wird ein typisches Neubaugebiets modelliert. Der Wärmepumpendurchdringungsgrad liegt dort nach [4] bei ungefähr 30 %. Insgesamt sind 34 Wärmepumpenanlagen an

das Netz angeschlossen. Die Gesamtscheinleistung aller installierten Anlagen beträgt ca. 85 kVA. Im Vergleich dazu wird in Szenario 2 mit einem deutlich höheren Durchdringungsgrad von rund 90 % simuliert. Hier sind 98 Wärmepumpenanlagen installiert und die Gesamtscheinleistung der Wärmepumpen beträgt ca. 250 kVA.

C. Vergleich der Szenarien

In Abbildung 5 ist ein Vergleich des Spannungsverlaufs der drei Szenarien an einem Knoten dargestellt. Es handelt sich dabei um einen Ausschnitt, in dem drei Tage abgebildet sind. Im Vergleich zum Spannungsverlauf des Basisszenarios (schwarz-gestrichelt) sind bei der Spannung des Szenario 1 (blau) größere Schwankungen zu erkennen. Des Weiteren wird in mehreren Zeitschritten die in [9] abgestimmte untere Grenze des zulässigen Spannungsbandes unterschritten (rot-gestrichelt), die eine maximale Abweichung von 4 % von der Nennspannung gestattet. Die höhere Durchdringung des Beispielnetzes mit Wärmepumpen in Szenario 2 (rot) verstärkt diesen Effekt. Dort werden teilweise Abweichungen von der Nennspannung von mehr als 6 % erreicht.

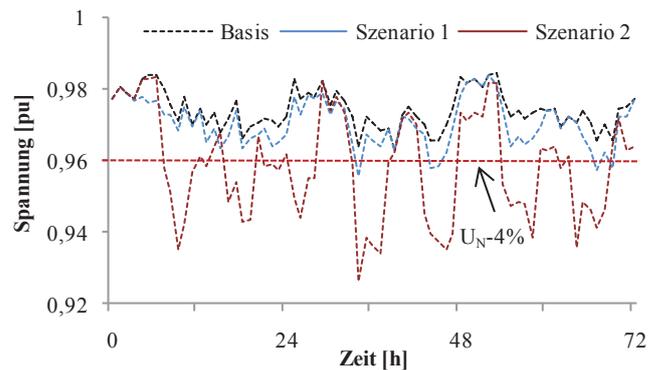


Abbildung 5 Vergleich der Spannungen an einem Knoten

Da die auftretenden Knotenspannungen der Szenarien mithilfe von Abbildung 5 nur schwerlich miteinander verglichen werden können und einzelne Spitzen schlecht zu erkennen sind, werden von den Zeitreihen der Knotenspannungen in den Szenarien Dauerlinien gebildet, die in Abbildung 6 dargestellt sind.

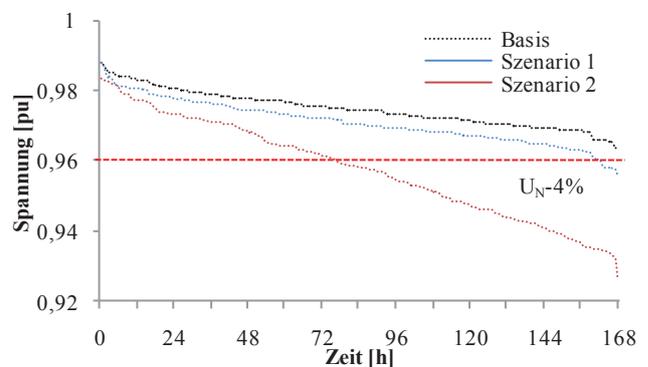


Abbildung 6 Vergleich der Spannungsdauerlinien an einem Knoten

Diese Dauerlinien eignen sich ideal für den Vergleich der Spannungen und auch die Grenzwertverletzungen lassen sich besser ablesen [6]. Weiterhin kann eine Aussage über das

Verhältnis der Zeiträume mit und ohne Grenzwertverletzung getroffen werden. In dem hier betrachteten Beispiel wird deutlich, dass in Szenario 2 die Spannung häufiger unterhalb der zulässige Grenze lag, als oberhalb.

Auch bei der Dauerlinie der Trafoauslastung, welche in Abbildung 7 dargestellt ist, ist ersichtlich, dass mit zunehmendem Wärmepumpenzubau die Auslastung deutlich ansteigt. Während im Basisszenario die maximale Auslastung bei ca. 51 % lag, ist für Szenario 1 ein leichter Anstieg zu erkennen, wobei das Maximum hier bei ca. 66 % liegt. In Szenario 2 ist die Trafoauslastung im Vergleich zu den zuvor betrachteten Szenarien deutlich angestiegen und das Maximum liegt bereits bei ca. 92 %. Die maximal zulässige Belastung des Transformators liegt bei 100 % der Bemessungsleistung, womit in Szenario 2 die verbleibende Reserve sehr gering ist. Weitere geringe Abweichungen des hier betrachteten Lastverhaltens oder andere hinzukommende neue Lasten können somit zu einer Überlastung des Transformators führen.

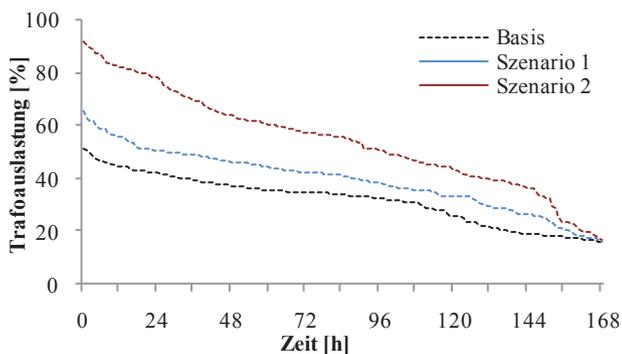


Abbildung 7 Vergleich der Dauerlinien der Trafoauslastung

V. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Der zunehmende Einsatz von Wärmepumpen in der Heizungstechnik, und der damit verbundene elektrische Leistungsbezug, erfordert ihre Berücksichtigung in Modellen zur Verteilnetzplanung. Während der Einsatz von Wärmepumpen abhängig von vielen Umweltfaktoren ist, die bislang nur sehr aufwändig in der Verteilnetzplanung berücksichtigt werden konnten, ermöglicht die Modellierung des Verhaltens von Wärmepumpen in einem Agenten eine detaillierte Abbildung. Neben der detaillierten Abbildung ist die Berücksichtigung von individuellen Anforderungen der Netzteilnehmer ein weiterer Vorteil bei der Simulation der Netzbelastung mit Hilfe der Simulationsumgebung auf Basis eines Multiagentensystems. Der Wärmepumpenagent stellt durch die erarbeitete Modellierung den gebäudespezifischen Bezug der Berechnungen durch die angenommenen Modellgebäude dar. Dadurch lassen sich die erzielten Ergebnisse mit ausreichender Genauigkeit auf vorhandene Bestandsgebäude übertragen. Auch die Berechnung der vom Netz aufgenommenen Leistung über die Jahresarbeitszahl ist

genauer als eine Abschätzung über den coefficient of performance der Wärmepumpe. Dennoch ist zu beachten, dass die verwendeten Jahresarbeitszahlen geringen jahreszeitlichen Schwankungen unterliegen, die in diesem Beitrag vernachlässigt werden.

Es ist gezeigt worden, dass die Wärmepumpen einen signifikanten Einfluss auf die Netzbelastung haben und dadurch bei der Verteilnetzplanung berücksichtigt werden sollten. Die implementierte Zweipunktregelung des Wärmepumpenagenten stellt eine gängige Praxis der Steuerung von Wärmepumpen dar. Hier besteht allerdings weiterer Forschungsbedarf, denn zukünftig werden vermehrt Wärmepumpen zum Einsatz kommen, bei denen der Leistungsbezug dynamisch moduliert wird. Zur Optimierung der Berechnungen des Agenten könnten weiterhin noch Näherungsverfahren für die Abbildung der Verluste durch Lüften und Infiltration sowie der solaren Wärmegewinne implementiert werden. Auch weitere Modellgebäude könnten zur Verbesserung der erzielten Ergebnisse beitragen. Der in diesem Beitrag entworfene Wärmepumpenagent stellt somit eine Basis zur Anpassung an zukünftige Entwicklungen sowie technologische Fortschritte dar.

LITERATURVERZEICHNIS

- [1] J. Reichelt, Wärmepumpen: Stand der Technik ; Beiträge des Symposiums "Wärmepumpen - Effizienz und Feldtest-Erfahrungen", veranstaltet vom Test- und Weiterbildungszentrum Wärmepumpen und Kältetechnik, TWK GmbH, am 5. Juni 2008 in Karlsruhe. Heidelberg, München, Landsberg, Berlin: Müller, 2008.
- [2] C. Bongs und M. Miara, Wärmepumpen: Heizen - Kühlen - Umweltenergie nutzen. Fraunhofer IRB Verlag, 2013.
- [3] J. Bonin, Handbuch Wärmepumpen. Beuth Verlag, 2012.
- [4] Institut für Wärme und Öltechnik e.V. (Hrsg.): Energetische Gebäudesanierung in Deutschland: Entwicklung und energetische Bewertung alternativer Sanierungsfahrpläne. Stuttgart 2013.
- [5] DIN V 4108-6:2003-06, Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Teil 6: Berechnung des Jahresheizwärme- und des Jahresheizenergiebedarfs, 2003.
- [6] André Seack, Jan Kays, Lars Jendernalik, Dominique Giavarra: Potentiale und Risiken bei der Verwendung innovativer Netzplanungsansätze. 13. Symposium Energieinnovation 2014, Graz 2014
- [7] Jan Kays, André Seack, Johannes Rolink, Christian Rehtanz: Integration of electric vehicles in the distribution grid planning process by extending a multi agent environment. Cired Workshop 2014, Rome, Italia, June 2014
- [8] EnEV 2009: Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden (Energieeinsparverordnung – EnEV) – Energieeinsparverordnung vom 29. April 2009
- [9] Deutsche Energie-Agentur GmbH (Hrsg.): Ausbau- und Innovationsbedarf der Stromverteilnetze in Deutschland bis 2030 (kurz: dena-Verteilnetzstudie). Berlin 2012.