

## Künstliche Intelligenz

# Luft/Wasser-Wärmepumpen leise und effizient betreiben

Aufgrund der geringeren Anschaffungskosten und der vergleichsweise einfachen Planung, Installation und Wartung gegenüber erdgekoppelten Wärmepumpen werden in Ein- und Mehrfamilienhäusern häufig Luft/Wasser-Wärmepumpen installiert. Mehr als 90% der im Jahr 2024 installierten Wärmepumpenheizungen nutzen die Umgebungsluft als Wärmequelle /1/. Ein häufiger Kritikpunkt ist die potenzielle Geräuschbelastung. Eine Studie an der RWTH Aachen hat Optimierungen untersucht.



① Der Geräuschpegel von Luft/Wasser-Wärmepumpen kann durch geeignete Maßnahmen künftig noch deutlich verringert werden.

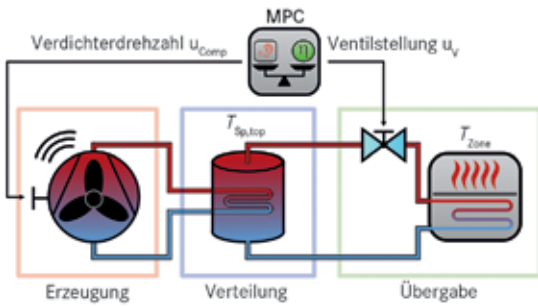
Um bei stark beschränktem Bauraum eine ausreichende Wärmeübertragung in Luft/Wasser-Wärmepumpen sicherzustellen, wird ein Lamellenwärmeübertrager als Verdampfer verbaut, der einen Ventilator benötigt. Bei einer hohen Anzahl von Luft/Wasser-Wärmepumpen in dicht bebauten Gebieten müssen die Geräusche des Wärmepumpenbetriebs, die hauptsächlich vom Ventilator und vom Verdichter erzeugt werden, auf ein Minimum reduziert werden. Untersuchungen zeigen, dass hohe Geräuschpegel stören können, woraus sich die Notwendigkeit wirksamer Lärminderungsmaßnahmen ergibt /2/. Die Geräusche von Wärmepumpen können durch Designoptimierungen, wie die Entwicklung geräuschreduzierter Komponenten sowie Anpassungen der Ventilatorgeometrie und des Verdampferdesigns verringert werden. Zudem haben viele Hersteller Silent-Modi implementiert, die besonders

laute Betriebspunkte des Verdichters und des Ventilators vermeiden.

Ein ähnlicher Ansatz zur Optimierung der Betriebsführung wird in der vorliegenden Studie untersucht. Dazu werden mehrere Wärmepumpenregler entwickelt und über eine gesamte Heizperiode simulativ miteinander verglichen. Das Vorgehen bei der Entwicklung des Modells und der Regler wird im folgenden Abschnitt beschrieben.

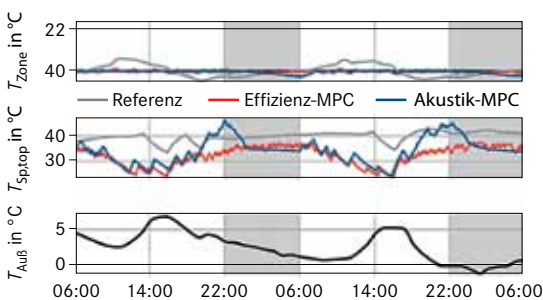
### Modellierung des Gebäudeenergiesystems

Das Gebäude und dessen Komponenten werden mit der Bibliothek BESMod (engl.: Building Energy System Modules) modelliert, die am Lehrstuhl für Gebäude- und Raumklimotechnik entwickelt wurde /3/. Die wesentlichen Komponenten des modellierten Gebäudeenergiesystems sind in Bild ② schematisch dargestellt.



② Schema des analysierten Gebäudeenergiesystems

Vor der Modellierung wurde eine im Handel erhältliche Wärmepumpe mit einer maximalen Heizleistung von 11,2 kW akustisch und thermisch am Hardware-in-the-Loop Prüfstand /4/ des Lehrstuhls vermessen. Mithilfe der Messungen kann ein kalibriertes Modell der Anlage entwickelt werden, das die Lautstärke sowie die Heizleistung und die elektrische Leistung in Abhängigkeit des Betriebspunkts zuverlässig vorhersagt. Zur zeitlichen Entkopplung der Erzeugung der Wärme durch die Wärmepumpe und des Verbrauchs im Gebäude wird ein Speicher mit einer Größe von ca. 800 l implementiert. Je nach Bedarf kann die Wärme, die von der Fußbodenheizung an das Gebäude abgegeben wird, durch die Ventilstellung im Heizkreislauf geregelt werden. Fortschrittliche Regelungen wie etwa die modellprädiktive Regelung (MPC) können Systeme effizienter betreiben als konventionelle Regler. MPCs benötigen zur effizienten Vorhersage des Systemverhaltens Modelle, deren zuverlässige Erstellung insbesondere für Gebäude häufig komplex ist und Fachexpertise erfordert. Für die Verbreitung von MPCs im Gebäudebereich erweist sich dies häufig als Hindernis. Das Problem kann jedoch durch die Nutzung datenbasierter Modelle (häufig auch künstliche Intelligenz genannt) gelöst werden. Diese Modelle können den zukünftigen Systemzustand basierend auf dem Ist-Zustand und externen Daten (beispielsweise Daten zur Wetterentwicklung) voraussagen. Durch die Integration der Vorhersagen kann eine modellprädiktive Regelung bereits auf Änderungen der Umgebungstemperatur reagieren, bevor diese tatsächlich eintreten /5/.



③ Zeitlicher Verlauf der Zonen- und Speichertemperatur für zwei beispielhafte Tage

Im Rahmen dieser Studie wird das thermische Verhalten eines jeden Teilsystems (dargestellt durch die farbigen Blöcke in Bild ②) von einem datengetriebenen Modell vorhergesagt. Zur Vorhersage der Lautstärke der Wärmepumpe werden die aufgenommenen Messdaten direkt genutzt. Die datengetriebenen Modelle werden mit Simulationsdaten trainiert, die zuvor im Betrieb mit einer konventionellen Regelung erzeugt wurden.

Um zu testen, inwiefern die Geräuschemissionen von Wärmepumpen durch MPCs verringert werden können, werden drei unterschiedliche Regler konzipiert und miteinander verglichen:

**Referenzregler:** Übliche Reglerkonfiguration aus dem Gebäudebestand. Die Speichertemperatur wird von einer Heizkurve in Abhängigkeit der Außentemperatur vorgegeben. Die Temperatur im Inneren des Gebäudes wird durch einen PI-Regler eingestellt.

**Effizienz-MPC:** Möglichst effizienter Betrieb ohne Verletzung des thermischen Komforts. Die Parameter der MPC werden so eingestellt, dass das System so effizient wie möglich betrieben wird. So kann nachher bewertet werden, wie hoch die Effizienz einbußen auf Kosten eines leiseren Betriebs sind.

**Akustik-MPC:** Bestrafung des Geräuschpegels. Die Wärmepumpe wird gleichzeitig leise und effizient betrieben.

Alle drei Regler werden jeweils für die Dauer einer gesamten Heizperiode in einer Simulation getestet. Dabei gelten für die Temperatur im Inneren des Gebäudes und den Schalldruckpegel (physikalische Größe, die die Lautstärke beschreibt) die Grenzwerte aus Tabelle ①.

### Ergebnisse

Im Folgenden wird der Referenzregler mit der Effizienz-MPC und der Akustik-MPC verglichen. Zuerst wird das Regelverhalten für zwei beispielhafte Tage im Januar vorgestellt. Danach erfolgt eine Einordnung für den gesamten Simulationszeitraum.

In Bild ③ ist die Zonentemperatur (also die Temperatur im Inneren des Gebäudes) und die Speichertemperatur für die drei untersuchten Regler mit der Außentemperatur und der solaren Einstrahlung über die Zeit aufgetragen.

**Referenzregler:** Zwischen 9 und 12 Uhr steigt die Zonentemperatur aufgrund der zunehmenden Außentemperatur und der solaren Einstrahlung an. Ab ca. 13 Uhr nehmen die Strahlung und die Außentemperatur wieder ab. Damit steigt der Heizbedarf. Da der Referenzregler keine Vorhersagen treffen kann, wird das Ventil erst geöffnet, wenn die Zonentemperatur geringer ist als 20 °C, wodurch thermischer Diskomfort entsteht. Aufgrund der vergleichsweise hohen Außentemperatur gegen Mittag sinkt die Soll-Speichertemperatur, die von der Heizkurve vorgegeben wird. Damit sinkt auch der Wärmebedarf und die Wärmepumpe beginnt zu takten.

**Effizienz-MPC:** Die Zonentemperatur wird über die beiden Tage konstant bei ca. 20 °C gehalten. Durch die Vorhersage des Systemverhaltens kann die Spei-



**Moritz Beckschulte**, M. Sc. Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Gebäude- und Raumklimatechnik, E.ON Energy Research Center, RWTH Aachen University



**Jonas Klingebiel**, M. Sc. Teamleiter Urbane Energiesysteme, Lehrstuhl für Gebäude- und Raumklimatechnik, E.ON Energy Research Center, RWTH Aachen University



**Florian Will**, M. Sc. Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Gebäude- und Raumklimatechnik, E.ON Energy Research Center, RWTH Aachen University



**Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dirk Müller**, Professor an der RWTH Aachen University, Leiter des Lehrstuhls für Gebäude- und Raumklimatechnik im E.ON Energy Research Center der RWTH Aachen und des Institute of Climate and Energy Systems – Energiesystemtechnik (ICE-1) des Forschungszentrums Jülich



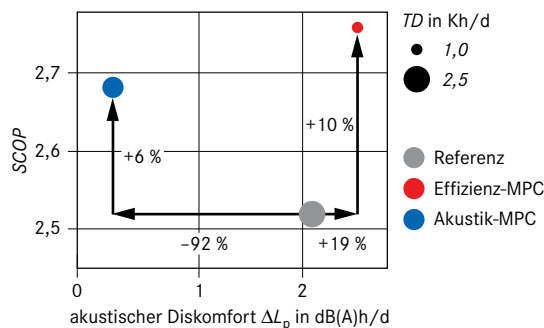
**Dr.-Ing. Christian Vering**, Teamleiter Kältekreisprozesse, Lehrstuhl für Gebäude- und Raumklimatechnik, E.ON Energy Research Center, RWTH Aachen University

**Tabelle 1** Grenzwerte, die von den Reglern beachtet werden müssen. Die Grenzwerte für den messbaren Schalldruckpegel am Gebäude resultieren aus den gesetzlichen Bestimmungen der Technischen Anleitung Lärm /6/.

Größe	Grenzwert	
	tagsüber (6–22 Uhr)	nachts (22–6 Uhr)
Zonentemperatur	$20\text{ °C} \leq T_{\text{zone}} \leq 22\text{ °C}$	
Schalldruckpegel	$L_p \leq 50\text{ dB(A)}$	$L_p \leq 35\text{ dB(A)}$

chertemperatur schon am Vormittag verringert werden, da der Wärmebedarf zu großen Teilen durch die solare Einstrahlung gedeckt wird. Die Speichertemperatur schwankt wegen einer hohen Anzahl an Verdichterstarts.

**Akustik-MPC:** Die Speichertemperatur wird tagsüber ähnlich wie von der Effizienz-MPC eingestellt. Bevor der erlaubte Schalldruckpegel um 22 Uhr gesenkt wird, erhöht die MPC ab ca. 19 Uhr die Speichertemperatur. So kann Wärme zwischengespeichert werden und in der Nacht zum Heizen des Gebäudes genutzt werden. An den beiden gezeigten Tagen erreicht die Speichertemperatur maximale Werte von  $44\text{ °C}$ . Zwischen etwa 22 und 0 Uhr sinkt die Speichertemperatur stark, da die Wärmepumpe ausgeschaltet ist. Ab 0 Uhr wird die Speichertemperatur durch einen Teillastbetrieb bei etwa  $35\text{ °C}$  gehalten. Dies reicht jedoch nicht aus, um die Temperatur im Inneren des Gebäudes bei  $20\text{ °C}$  zu halten. Das Regelverhalten wird abschließend in Bild 4 für die gesamte Heizperiode zusammengefasst. Die Effizienz-MPC kann den SCOP um ca. 10 % erhöhen, wohingegen der akustische Diskomfort ebenfalls um ca. 19 % erhöht wird. Die Akustik-MPC verringert den akustischen Diskomfort im Vergleich zur Referenzregelung um 92 %. Gleichzeitig kann die Effizienz über die gesamte Heizperiode um 6 % gesteigert werden.



**4** Vergleich der KPIs der Heizperiode für die drei analysierten Regelungen. Der thermische und akustische Diskomfort wird jeweils in der Einheit Kh/d oder dB(A)h/d angegeben. Ist die Temperatur der Zone im Inneren des Gebäudes eine Stunde lang ein Kelvin zu kalt ergibt sich ein thermischer Diskomfort von 1 Kh/d. Gleiches gilt für die Überschreitung des erlaubten Schalldruckpegels aus der akustischer Diskomfort resultiert.

gert werden. Zusätzlich zum SCOP und dem akustischen Diskomfort  $\Delta L_p$  wird der thermische Diskomfort anhand der Größe der Punkte dargestellt. Da beide MPCs Vorhersagen der Außentemperatur und der solaren Einstrahlung nutzen, um den Betriebsverlauf zu berechnen, kann der thermische Diskomfort von beiden MPCs im Vergleich zur Referenzregelung verringert werden.

## Zusammenfassung und Ausblick

Durch die Vorhersage des Energiesystemzustands konnten die Lautstärke und die Effizienz der Wärmepumpe im Vergleich zum Referenzregler jeweils signifikant verbessert werden. Die Studie zeigt, dass durch den Einsatz von modellprädiktiven Reglern die nächsten Wärmepumpengenerationen noch effizienter und noch leiser bei mindestens gleichbleibendem Komfort betrieben werden können. Durch strategische Entscheidungen wie das Verschieben von Betriebszeiten in den Tag und die Feinabstimmung von Verdichter- und Ventilator Drehzahlen können Geräuschbelastigungen deutlich verringert werden. Der Aufstellungsort der Wärmepumpe hat dabei einen großen Einfluss auf die wahrnehmbaren Geräusche. Trotz einiger Herausforderungen zeigt dieser Beitrag vielversprechende Ansätze, wie durch intelligente Steuerungen Wärmepumpensysteme effizienter und leiser betrieben werden können. Um diese Ansätze in die Praxis umzusetzen, sind als nächstes, Experimente nötig, um zu zeigen, dass die Ansätze auch an realen Anlagen umgesetzt werden können.

## Literatur

- 1/ Bundesverband Wärmepumpe (BWP) e. V.: Wärmepumpen: Markt geht auf 193.000 Geräte zurück, aber Vertrauen in die Förderung steigt. Zugriffen: 07.02.2025: <https://www.waermepumpe.de/presse/pressemitteilungen/details/waermepumpen-markt-geht-auf-193000-geraete-zurueck-aber-vertrauen-in-die-foerderung-steigt/>
- 2/ Reichl, C.: IEA HPT Annex63: Placement Impact on Heat Pump Acoustics, Annex 63. Zugriffen: 19.02.2025: <https://heatpumpingtechnologies.org/annex63/>
- 3/ Wüllhorst, F.; Maier, L.; Jansen, D.; Kühn, L.; Hering, D.: BESMod – A Modelica Library providing Building Energy System Modules, in Proceedings of the American Modelica Conference 2022, Dallas, TX, US, Okt. 2022, S. 9–18. doi: 10.3384/ECP211869
- 4/ Nürnberg, M.; Mehrfeld, P.; Huchtemann, K.; Müller, D.: Hardware-in-the-Loop test bench setup and its application to determine seasonal performance of heat pump systems“, in Proceedings of the 12th IEA Heat Pump Conference, Rotterdam, Niederlande, Mai 2017. [Online]. Verfügbar unter: <http://publications.rwth-aachen.de/record/712437>
- 5/ Stoffel, P.; Berkold, M.; Müller, D.: „Real-life data-driven model predictive control for building energy systems comparing different machine learning models“, Energy Build., Bd. 305, S. 113895, Feb. 2024, doi: 10.1016/j.enbuild.2024.113895
- 6/ Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrheinwestfalen, Sechste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes- Immissionsschutzgesetz – Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm, Bd. 62.0–01. 2017, S. 18. Zugriffen: 21.12.2023: [https://igsvtu.lanuv.nrw.de/vtu/doc.app?P\\_VTU\\_SYSID=002-31&DATEI=6/dokus/62001.pdf](https://igsvtu.lanuv.nrw.de/vtu/doc.app?P_VTU_SYSID=002-31&DATEI=6/dokus/62001.pdf)