

## **BEWERTUNG DES WÄRMEBEDARFS DEUTSCHER BESTANDSWOHNGEBÄUDE MIT HILFE ÖRTLICH UND ZEITLICH AUFGELÖSTER GEBÄUDESIMULATIONEN**

C. Vering<sup>1</sup>, M. Mortimer<sup>1</sup>, M. Nürnberg<sup>1</sup> und D. Müller<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Lehrstuhl für Gebäude- und Raumklimatechnik, RWTH Aachen, Deutschland

### KURZFASSUNG

Die optimale Auslegung von Luft-Wärmepumpen ist in Deutschland aufgrund der hohen Gebäudeanzahl und dynamischer Betriebsrandbedingungen komplex. Neben Änderungen der Umgebungsbedingungen variieren gleichzeitig Gebäudelasten. Eine detaillierte Optimierung jeder Wärmepumpe zur Versorgung ist daher nur mit sehr hohem Aufwand möglich.

Zur Reduktion der Komplexität und zum Verständnis der Betriebsdynamik tragen systematische Wetter- und Gebäudeanalysen bei. Diese können mit Hilfe örtlich und zeitlich aufgelöster Gebäudesimulationen durchgeführt werden.

Zur Verwendung von Gebäudesimulationen sind valide Eingangsdaten essentiell. Diese werden in statistischer Form systematisch aufgearbeitet und als Landkarten zur Verfügung gestellt. Eine Inputdatenklassifizierung reduziert den Rechenaufwand von etwa 18 Millionen Gebäudesimulationen für ganz Deutschland auf 3520.

### ABSTRACT

Optimal design of heat pumps in Germany is complex due to the large number of buildings and dynamic operating conditions. In addition to changes in the ambient conditions, building loads vary. A detailed optimisation of each heat pump covering the heat demand is therefore only possible at great expense.

Systematic weather and building performance analyses help to understand the operating dynamics of heat pump systems. These can be carried out by spatial and temporal resolved building performance simulations (BPS).

Valid input data are essential to utilize BPS. In this work, data are statistically processed and made available as geographical maps. Regarding Germany, input data processing reduces the computational effort from about 18 million BPS to 3520.

### EINLEITUNG

Etwa 30 % der Emissionen in Deutschland sind auf die Bereitstellung von Wärme in Gebäuden zurückzuführen [Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V., 2017]. Größtenteils wird Wärme durch konventionelle Technologien, die Energie aus fossilen Quellen beziehen, bereitgestellt. Im Rahmen der Energiewende stellen Wärmepumpensysteme eine emissionsarme Alternative dar, um konventionelle Technologien nachhaltig abzulösen.

Im Vergleich zu konventionellen Technologien ist die Effizienz der Wärmepumpe äußerst temperatur- und lastabhängig. Unter- oder Überdimensionierungen der Wärmepumpe führen zu Teillastbetrieb, erhöhten Schaltvorgängen oder vermehrter Gebäudeunterversorgung, die durch Heizstabzuschaltung kompensiert werden muss. Diese Betriebsbedingungen führen zu hohen Effizienzverlusten, sodass die Potentiale der Technologie nicht vollständig ausgeschöpft werden können. Zur optimalen Auslegung und zum daraus folgenden optimalen Betrieb von Wärmepumpensystemen ist somit die Kenntnis des zu deckenden Bedarfs unerlässlich. [Karlsson, 2007]

Ein Wärmepumpensystem wird im Rahmen dieses Beitrags als ein monoenergetisch bivalentes Versorgungssystem bestehend aus einer Luft-zu-Wasser-Wärmepumpe (kurz: Wärmepumpe) und einem elektrischen Heizstab aufgefasst. Zur zeitlichen Entkopplung von Erzeugung und Bedarf werden ein Warmwasser- und ein Trinkwarmwasserspeicher eingesetzt. Sie dienen damit zur Reduktion von Schaltvorgängen. Ein optimales Auslegungsverfahren muss folglich die Größen dieser Einzelkomponenten festlegen und eine Betriebsstrategie vorsehen.

In der Literatur sind in Deutschland zwei standardisierte Auslegungsverfahren anerkannt, welche in den Richtlinien DIN EN 15450 [DIN, 2007] und VDI 4645 [VDI, 2018] beschrieben werden. Diese Verfahren legen Wärmepumpensysteme nach Normheizlast und temperaturabhängiger Heizleistung aus. Die Temperaturbedingungen werden standortgebunden vorgegeben. Die Berechnung der Heizleistung erfolgt nach [DIN EN 12831, 2017] und

beschreibt die thermische Leistung, die zur Aufrechterhaltung konstanter Innenraumtemperaturen über die Gebäudehülle an die Umgebung abführt wird. Der obere Grenzwert dieser Wärmeleistung fällt bei Normaußentemperatur an und wird Heizlast genannt [DIN EN 12831, 2017]. Der Betrieb der Wärmepumpensysteme wird durch die Berücksichtigung einer Heizkurve mit einer Hysterese um die Soll-Temperaturen vorgesehen.

Vering et al. zeigen in [Vering, 2019] exemplarisch für ein Bestandsgebäude, dass mit Hilfe beider Auslegungsverfahren Wärmepumpensysteme ausgelegt und versorgungssicher hinsichtlich der Speichertemperaturen betrieben werden können. Die beschriebenen Systeme decken also jeden anfallenden Wärmebedarf bei definierten Außen- und Soll-Temperaturen. In den Verfahren selbst wird jedoch keine Häufigkeitsverteilung von Bedarfen und Temperaturen zur Auslegung hinzugezogen. Diese Art der Auslegung führt demnach zu versorgungssichereren Systemen hinsichtlich möglicherweise auftretender nomineller Leistungen und Temperaturen. Eine optimale Auslegung unter Berücksichtigung häufiger Betriebsbedingungen erfolgt allerdings nicht.

Häufigkeitsverteilungen von Betriebsbedingungen können durch Wetter- und Gebäudeanalysen abgeschätzt werden. Zur Durchführung von Wetteranalysen sind Wetterdaten notwendig. Dieser werden beispielsweise vom deutschen Wetterdienst [Deutscher Wetterdienst, 2015] bereitgestellt. Gebäudeanalysen können sowohl im Feld als auch simulativ durchgeführt werden. Da Felduntersuchungen für etwa 18 Millionen Gebäude einen hohen zeitlichen Aufwand bedeuten und häufig kostenintensiv sowie fehleranfällig sind, werden im Rahmen dieser Arbeit simulative Analysen durchgeführt. Diese dienen der Bestimmung von Häufigkeitsverteilungen von Wärmebedarfen.

Eine Möglichkeit zur Abschätzung typischer Wärmebedarfe im Gebäudebestand stellen örtlich und zeitlich aufgelöste Gebäudesimulationen dar. Die Basis solcher Simulationen bilden parametrierbare Gebäudemodelle. Diese sind in der Literatur verfügbar und werden kommerziell [TRNSYS, 2020, IDA, 2020] und frei verfügbare bereitgestellt [Energy Plus, 2019, Müller, 2016]. Je nach Untersuchungsziel können vereinfachte Einzonen-Modelle, sogenannte „reduced order models“ (ROM) bis hin zu sehr komplexen Mehrzonen-Modellen, den „high order models“ (HOM) eingesetzt werden.

Zur ersten Abschätzung der Häufigkeitsverteilung von Bedarfen deutscher Bestandswohngebäude werden im Rahmen dieser Arbeit ROM verwendet. Zum einen ist deren Berechnungsdauer im Vergleich zu HOM

deutlich reduziert und zum anderen wird durch die statistische Untersuchung vieler Gebäudesimulationen die Ergebnisgüte durch die Verwendung von ROMs nicht wesentlich beeinträchtigt.

Unter Verwendung von Gebäudemodellen aus der quell-offenen Bibliothek AixLib [Müller, 2016] können über ein zusätzliches Tool „Teaser“ [Remmen, 2017] archetypische Gebäudemodelle erstellt und in Modelica mit Dymola simuliert werden [Tiller, 2019]. Die Simulationsergebnisse können analysiert und bewertet werden. Dieser Arbeitsablauf erlaubt unter Verwendung geeigneter Eingangsdaten die Bewertung deutscher Bestandswohngebäude.

Zur Parametrierung von Gebäudemodellen gibt es unterschiedliche Parametersätze. Um auf eine einheitliche Datenbasis zurückzugreifen, die für Deutschland existiert, wird der Zensus 2011 und seine Fortschreibung verwendet. Weitere Datenbanken wie infas 360 wurden aufgrund der Verfügbarkeit bisher nicht untersucht [infas 360, 2020]. Die hier vorgestellte Analyse und die nachfolgende Zusammenfassung der Ergebnisse macht den Zensus für Gebäudesimulationen nutzbar. [Statistische Ämter des Bundes und der Länder, 2015, Statistisches Bundesamt, 2018]

Im Rahmen dieses Beitrags wird ein automatisierter Arbeitsablauf dazu verwendet, eine statistische Übersicht über Wärmebedarfe in Deutschland zu erhalten. Daraus kann eine Wärmebedarfsstruktur für den Gebäudebestand abgeschätzt werden, die als Grundlage zur optimalen Auslegung von Wärmepumpensystemen dienen kann. Dieser Beitrag fördert daher systematisch die optimale Auslegung von Wärmepumpensystemen durch die statistische Bewertung des Wärmebedarfs deutscher Bestandswohngebäude. Dazu werden energetische Gebäudesimulationen durchgeführt:

- in Kapitel 2 wird die Struktur eines Arbeitsablaufs von Eingangsdaten bis zum Wärmepumpensystem vorgestellt.
- Eine Wetter- und Gebäudeanalyse erfolgt in Kapitel 3 auf Basis aufbereiteter Zensusdaten zur Festlegung notwendiger Gebäudesimulationen.
- Die Gebäudebestandsstruktur wird schließlich in Kapitel 4 mit zugehörigen Wärmebedarfsclustern vorgestellt.

Zur abschließenden Einordnung der Ergebnisse wird der kumulierte Gebäudeenergiebedarf mit aktuellen Werten des BMWi verglichen. Der Beitrag wird schließlich zusammengefasst und ein Ausblick für die weitere Verwendung des Arbeitsablaufs wird herausgearbeitet.

## WEG ZU EINEM EMISSIONSARMEN GEBÄUDESEKTOR

Die Wärmeversorgung des Gebäudesektors basiert weitestgehend auf konventionellen Technologien, die fossile Energieträger beziehen. Die benötigte Wärme wird durch Verbrennung der Energieträger bereitgestellt. Durch die Verbrennung entstehen Emissionen als direktes Produkt. Eine Emissionsreduktion kann daher lediglich durch eine Reduktion des Bedarfs oder durch effizientere Technologien erfolgen. Bedarfsreduktionen können durch erhöhte Dämmstandards erzielt werden. Diese können jedoch kostenintensiv sein, sodass in vielen Fällen ein Austausch der Technologie einen kostenärmeren Weg beschreibt. Die Verwendung einer effizienteren Technologie, die ebenfalls verbrennungsbasiert operiert, ist begrenzt möglich, da Effizienzgewinne ein Maximum aufweisen.

Eine vielversprechende Technologie, die eine emissionsarme Wärmeversorgung ermöglicht, ist die Wärmepumpe. Die Bereitstellung von Brauchwärme mittels Strom erfolgt durch den Bezug von Umweltwärme ressourcenschonend. Gleichzeitig wird durch die Nutzung von Strom die Elektrifizierung der Wärmebereitstellung vorangetrieben. In zukünftigen Szenarien wird die Stromversorgung durch Technologien realisiert, die größtenteils Energie aus regenerativen Quellen beziehen. Dadurch trägt die Wärmepumpe systematisch zu einem emissionsarmen Gebäudesektor bei.

In Abbildung 1 wird der emissionsarme Gebäudesektor als Ziel formuliert. Unter nationalen Randbedingungen entspricht das einer Reduktion des Primärenergieverbrauchs um 80 % bis 2050. Um dieses ambitionierte Ziel systematisch zu erreichen, muss die Wärmeversorgung im Gebäudesektor umstrukturiert werden. Als Ausgangslage kann in Deutschland dabei von etwa 18 Millionen Gebäuden im Bestand ausgegangen werden.

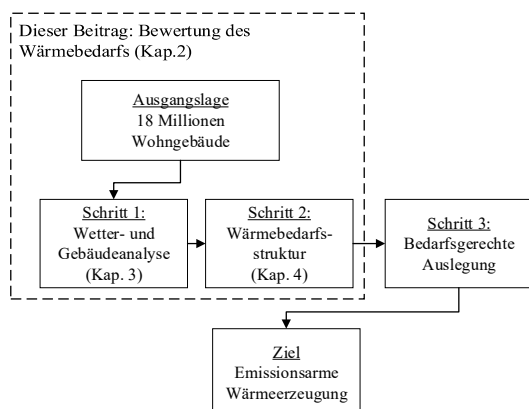


Abbildung 1: Umstrukturierung der Wärmeversorgung von Bestandsgebäuden durch die Integration optimal ausgelegter Wärmepumpen.

Zur Forcierung einer emissionsarmen Wärmeversorgung des Gebäudebestands (Abb. 1) sind drei Schritte notwendig. In einem ersten Schritt wird für Deutschland eine Wetter- und Gebäudeanalyse durchgeführt. Diese wird statistisch durchgeführt und beschrieben. Im nächsten Schritt werden die statistischen Daten als Eingangsparameter für Gebäudesimulationen verwendet, um die örtlich und zeitlich aufgelöste Wärmebedarfsstruktur abzuschätzen. Unter Zuhilfenahme dieser Struktur ist es dann in Schritt 3 möglich, Wärmepumpen bedarfsgerecht auszulegen, um das Potential dieser Technologie ausschöpfen zu können. Im Rahmen dieses Beitrags wird der Weg bis zur Wärmebedarfsstruktur dargestellt. Die bedarfsgerechte Auslegung kann aus Gründen des Umfangs lediglich im Ausblick diskutiert werden.

Die Wetter- und Gebäudeanalyse erfolgt in Kapitel 3 und dient der Bereitstellung valider Eingangsdaten für die Berechnung der Wärmebedarfsstruktur in Kapitel 4. Es werden Wetterdaten vom Deutschen Wetterdienst verwendet [Deutscher Wetterdienst, 2015]. Das vorgestellte Szenario berücksichtigt dabei normale Testreferenzjahre. Eine Abschätzung für kalte und warme Jahre wird nicht beschrieben.

Die zugehörige Gebäudeanalyse wird auf Basis der Daten des Zensus 2011 und dessen Fortschreibung durchgeführt. Der Zensus basiert auf der typischen Beschreibung von Gebäuden und Wohnungszählungen.

Im Rahmen des Zensus 2011 wurden etwa 17,5 Millionen Fragebögen an Gebäudeeigentümer versendet [Statistische Ämter des Bundes und der Länder, 2015]. Die zugehörige Fortschreibung ist zusätzlich eine Hochrechnung auf Basis des Zensus 2011, die durch das Statistische Bundesamt durchgeführt wurde [Statistisches Bundesamt, 2018].

Die Daten des Zensus gelten dabei für alle Regionen, wohingegen sich Wetterdaten häufig auf Städte beziehen. Mit Hilfe dieser Eingangsdaten können dann örtlich und zeitlich aufgelöste Gebäudesimulationen durchgeführt werden.

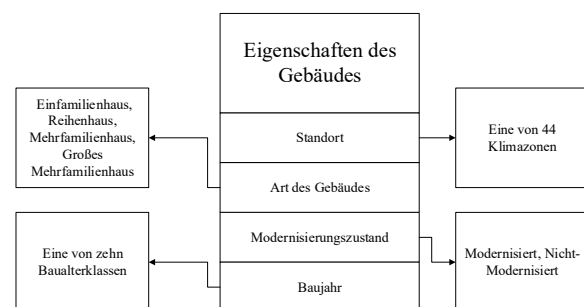


Abbildung 2: Wesentliche Parameter zur Durchführung von Gebäudesimulationen und deren Freiheitsgrade innerhalb dieses Beitrags.

Energetische Gebäudesimulationen erlauben eine Abschätzung von Gebäudebedarfen. Im Rahmen dieser Arbeit werden Gebäudemodelle mit Hilfe des Tools Teaser automatisiert erstellt. Zur Modellerstellung sind unterschiedliche Parameter festzulegen. Diese Parameter sind schematisch in Abbildung 2 dargestellt. Neben der Nettogrundfläche sind der Standort des Gebäudes, die Art des Gebäudes, der Modernisierungszustand und das ungefähre Baujahr notwendig, um eine Grundparametrierung zu erreichen. Die erstellten Modelica-Modelle werden anschließend in Dymola simuliert. Durch die statistische Zuordnung kann für Deutschland die Wärmebedarfsstruktur ermittelt und anschließend zur bedarfsgerechten Auslegung eingesetzt werden.

### WETTER- UND GEBÄUDEANALYSE

Auf einer Grundfläche von etwa 357.386 km<sup>2</sup> sind in Deutschland etwa 18 Millionen Bestandsgebäude verteilt [Statistische Ämter des Bundes und der Länder, 2015]. Die optimale Auslegung von maßgeschneiderten Wärmepumpen für jedes einzelne Gebäude in unterschiedlichen Klimazonen ist daher zeit- und kostenintensiv und lediglich unter sehr hohem Rechenaufwand möglich. Zusätzlich sind Gebäude und deren Verwendung durch die Nutzer zwar nie identisch, aber aus Sicht des Bedarfs sicherlich ähnlich, was eine statistische Untersuchung der Bedarfsverteilung erlaubt.

Zur systematischen Reduktion der 18 Millionen möglichen Simulationen werden die Gebäudeeigenschaften entsprechend der Merkmale aus Abbildung 2 unter der Verwendung von Wetterdaten des Deutschen Wetterdienstes (kurz: DWD) zur Berücksichtigung des Standorts [Deutscher Wetterdienst, 2015] und Statistiken des Zensus 2011 klassifiziert.

Der deutsche Wetterdienst veröffentlicht Daten für jeden Quadratkilometer in Deutschland [Deutscher Wetterdienst, 2015]. Diese Daten sind speziell zusammengestellte Datensätze, die für jede Stunde eines Jahres verschiedene meteorologische Daten enthalten. Sie sollen einen mittleren, aber für das Jahr typischen Witterungsverlauf repräsentieren. Sie haben allerdings nur einen gerigen Nutzen für die vorliegende Arbeit, da im Zensus und in der Fortschreibung ausschließlich Daten zu Stadt- und Landkreisen veröffentlicht sind. Daher muss ein Adaptionsverfahren entwickelt werden, welches die beiden Informationsquellen zusammenführt.

Hierzu wird ein Grenzwert festgelegt, der ein Maß für die Sensitivität eines Parameters auf die Bedarfsberechnung beschreibt. Im Rahmen der Arbeit wird dieser zu 2 kWh/(m<sup>2</sup>\*a) festgelegt. Das entspricht etwa 20 % des Grundparameters mit dem

geringsten Einfluss auf den Wärmebedarf eines Wohngebäudes. Unter Zuhilfenahme des Grenzwerts werden die Wetterdatensätze benachbarter Städte verglichen. Sollte der Standorteinfluss in zwei Städten einen geringeren Einfluss auf den Wärmebedarf haben als 2 kWh/(m<sup>2</sup>\*a), werden die Städte zu einer Klimazone zusammengefasst. Anderenfalls entstehen zwei Klimazonen. Das bedeutet, dass zwei Städte deren Wärmebedarf durch den Wetterunterschied um mehr als 2 kWh/(m<sup>2</sup>\*a) abweicht, nicht in einer Klimazone liegen können. Zur Berechnung des Bedarfs ist ein mittleres deutsches Gebäude verwendet worden.

Insgesamt sind durch diese Grenzwertbetrachtung 44 Klimazonen ermittelt worden, die die gesamte Grundfläche Deutschlands repräsentieren. Es sei darauf hingewiesen, dass die Klimadaten von Städten verwendet wurden, da gerade hier besonders viel Wohngebäude angesiedelt sind.

Zur weiteren Klassifizierung von Gebäuden ist deren Art ein einflussreicher Parameter. Hierzu zählt die Berücksichtigung der unterschiedlichen Gebäudetypen von Gebäuden [Institut für Wohnen und Umwelt, 2015]. In diesem Beitrag werden vier Gebäudetypen implementiert:

- Freistehende Ein- oder Zweifamilienhäuser,
- Reihenhäuser,
- Mehrfamilienhäuser und
- große Mehrfamilienhäuser.

In einem nächsten Schritt wird der Modernisierungszustand zur Beschreibung des Gebäudes nach [Cischinsky, 2016] vorgestellt. Ein Gebäude kann durch diese Beschreibung einen Wert zwischen vollständig modernisiert und nicht modernisiert annehmen. Eine Abschätzung des Modernisierungsgrad des deutschen Gebäudebestands konnte Cischinsky durch eine Datenerhebung feststellen.

Letztlich wird in diesem Beitrag das etwaige Baujahr eines Gebäudes verwendet, um den Dämmstandard sowie vermutlich verwendete Baumaterialien abzuschätzen. Diese sind ebenfalls aus dem Zensus 2011 abgeleitet worden. Durch die Charakterisierung des Gebäudebestands anhand der vorgestellten Merkmale in Verbindung mit den vorgeschlagenen Klimazonen kann die Anzahl notwendiger Gebäudesimulationen erheblich verringert werden. Mit Hilfe dieser Zusammenfassung der Gebäude unter Berücksichtigung der Merkmale müssen 3520 repräsentative Gebäudemodelle erstellt und simuliert werden.

Zur Visualisierung der Gebäudebestandsstruktur haben wir in Anlehnung an den Zensus als Darstellungsform Landkarten gewählt, um örtliche Gemeinsamkeiten und Unterschiede in Deutschland feststellen zu können.

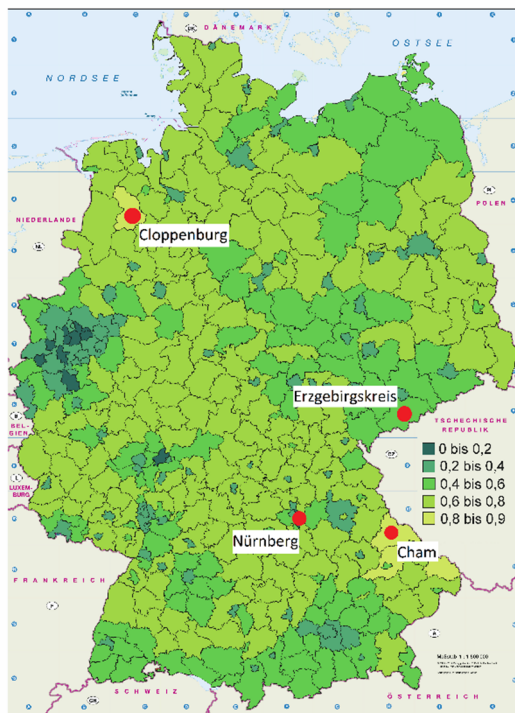


Abbildung 3: Anteil der Einfamilienhäuser am Gesamtbestand in Stadt- und Landkreisen.

In Abbildung 3 ist beispielhaft für die Verteilung der Gebäudebestandsstruktur der Anteil an Einfamilienhäusern in Stadt- und Landkreisen abgebildet. Die Anteile werden zwischen Null und Eins angegeben und sind zur Erhöhung der Übersichtlichkeit in 20 %igen Abstufungen zusammengefasst.

In dieser Landkarte kann beispielsweise das Ruhrgebiet als Ballungsgebiet mit einem geringen Anteil an Einfamilienhäusern nachgewiesen werden. Ähnliche Beobachtungen gelten für definierte Stadtkreise wie Berlin, Hamburg oder Bremen.

Zur Durchführung detaillierter Analysen können einzelne Land- und Stadtkreise zum Vergleich herangezogen werden. Zwei signifikant unterschiedlich aufgebaute Kreise, sind die des Landkreises Cham im Vergleich zum Stadtkreis Nürnberg. Nürnberg liegt in diesem Vergleich etwa 150 km westlich von Cham, daher liegen beide Kreise regional nah beieinander. Beide sind ebenfalls in der Landkarte in Abbildung 4 eingezeichnet.

Charakteristisch für den Landkreis Cham ist mit 84 % der hohe Anteil an Einfamilienhäusern (EFH) im Vergleich zu etwa nur 9 % Reihenhäusern (RH) und 7 % Mehrfamilienhäusern (MFH). Der Anteil an großen Mehrfamilienhäusern (GFH) ist in diesem Landkreis vernachlässigbar gering.

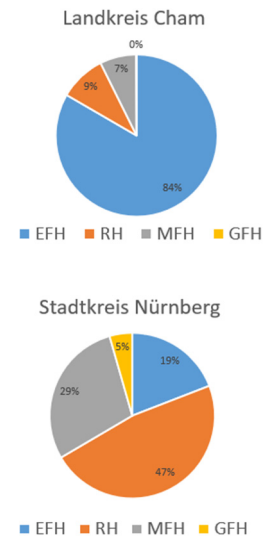


Abbildung 4: Vergleich der Gebäudetypenanteile des Landkreises Cham mit dem Stadtkreis Nürnberg.

Im Vergleich dazu weist der Stadtkreis Nürnberg lediglich 19 % EFH auf, der Anteil an RH vervielfacht sich jedoch auf etwa 47 %. Die übrigen 34 % verteilen sich auf 29 % MFH und 5 % GFH.

Der Unterschied macht deutlich, dass in nicht weit entfernten Kreisen sehr unterschiedliche Strukturen vorliegen, die stark variierende Bedarfe implizieren. Diese Informationen können zur optimalen, bedarfsgerechten Auslegung von Wärmepumpensystemen sehr wertvoll sein, da unterschiedliche Anlagentypen ortsabhängig dimensioniert und betrieben werden können.

Ein weiteres Merkmal zur Analyse des Gebäudebestands ist das Baujahr oder die Baualterklasse. Für einen exemplarischen Vergleich werden in Abbildung 5 der Stadtkreis Cloppenburg im Westen von Deutschland mit dem Erzgebirgskreis im Osten von Deutschland herangezogen. Beide sind ebenfalls in Abbildung 3 eingezeichnet. Die Baualterklassen sind in unterschiedliche Abstufungen entsprechend der Abbildung 6 segmentiert.

Im Kreis Cloppenburg befinden sich etwa 16.000 Gebäude der Baualterklasse 1949-1978, was einem Anteil von etwa 35 % entspricht. Das beschreibt die Baualterklasse der Nachkriegszeit, in der vornehmlich mit Trümmermaterial gebaut wurde, wodurch diese Baustoffe schlechtere Dämmeigenschaften aufweisen als die der anderen Baualterklassen.

Im Vergleich dazu weisen im Erzgebirgskreis etwa 33 % der Gebäude eine Baualterklasse der Vorkriegszeit auf. Von diesen Gebäuden wurden etwa 25.000 vor 1919 errichtet.

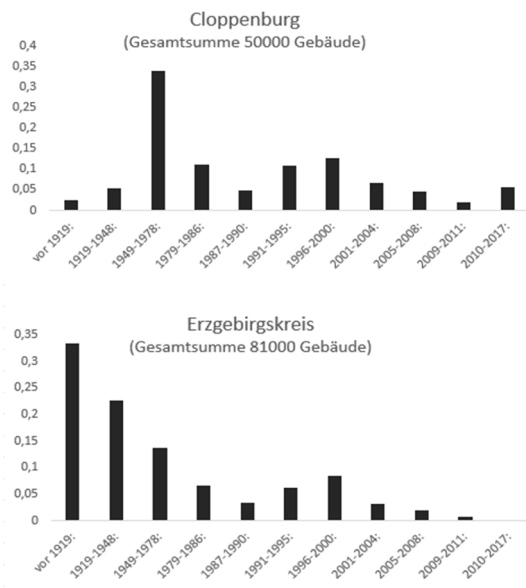


Abbildung 5: Vergleich der Baualtersklassen im Kreis Cloppenburg und dem Erzgebirgskreis.

Die Ergebnisse zeigen auch hier, dass eine Analyse der Gebäudebestandsstruktur einen guten Aufschluss darüber geben kann, inwiefern sich Bedarfe für Wärmepumpensysteme ergeben können. Große Unterschiede in den Baualtersklassen lassen darauf schließen, dass für diese Klassen unterschiedliche Wärmepumpensysteme optimal ausgelegt und betrieben werden müssen. Unter Verwendung dieser Struktur werden Bedarfsberechnungen durchgeführt.

### WÄRMEBEDARFSSTRUKTUR

Bedarfsberechnungen erfolgen anhand der Simulation der Modelle unter Berücksichtigung der zuvor vorgestellten Daten. Obwohl eine zu simulierende Datenreduktion von über 99 % durch die statistische Klassifizierung der Gebäude erzielt werden konnte, ist mit 3520 durchzuführender Gebäudesimulationen die absolute Anzahl weiterhin zu hoch, um eine manuelle Durchführung und Auswertung der Simulationen vornehmen zu können.

Daher wird Teaser zur Erstellung von Gebäudemodellen angewandt und mit der vorgeschalteten Parametervariation gekoppelt. In dieser Variation werden die Parameter für die Standorte permutiert und Simulationen entsprechend der voreingestellten Parameter durchgeführt. Wenn aufgrund eines gleichen Standorts beispielsweise ein Parameterpaar wiederholt auftritt, wird auf bereits erzielte Simulationsergebnisse verwiesen und keine neue Simulation durchgeführt. Die einzelnen Berechnungsschritte sind in Abbildung 6 dargestellt.

Die Simulationsmodelle erstellt Teaser in der Sprache Modelica. Die erstellten Modelle werden mit Python in Dymola eingeladen, wo die Simulation durchgeführt werden kann. Als Randbedingungen für Simulationen dienen die standortabhängigen, stündlich aufgelösten Wetterdaten des DWDs.

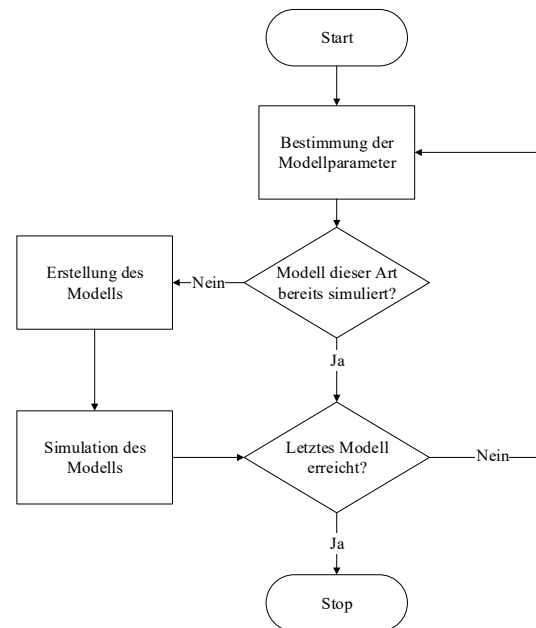


Abbildung 6: Automatisierte Arbeitsabläufe, die zur Simulation des Gebäudebestands ausgeführt werden.

Die Ergebnisse sämtlicher Gebäudesimulationen werden im Rahmen der Arbeit zur Weiterverarbeitung genutzt. Zum einen wird aus jeder Jahressimulation der durchschnittliche Wärmebedarf in kWh/m<sup>2</sup> bestimmt. Zusätzlich wird der maximale Wärmebedarf in kWh/m<sup>2</sup> ausgelesen. Letztlich wird der Gesamtwärmebedarf jeder Simulation über ein Jahr integriert und über die ermittelte Häufigkeitsverteilung extrapoliert.

Die Ergebnisse der Gebäudesimulationen sind in Abbildung 7 dargestellt. Mit Hilfe des k-medoids-Clusterverfahrens können die Ergebnisse in fünf typische Cluster zusammengefasst werden. Diese fünf Cluster repräsentieren im Mittel typische durchschnittliche Wärmebedarfe (22.4, 55.6, 81.6, 102.6, 140.6 kWh/m<sup>2</sup>) mit entsprechenden Ausreißern zu deren korrespondierenden Maxima (90.5, 184.6, 271.0, 335.8, 440.2 kWh/m<sup>2</sup>). Diese Bedarfe erlauben eine bessere Einschätzung, welche Leistungsklassen Wärmepumpen im Gebäudebestand decken können sollten. Damit können Wärmepumpensysteme bedarfsgerecht ausgelegt werden, wodurch deren Potential zur nachhaltigen Gebäudeversorgung besser ausgeschöpft wird.

Abschließend werden sämtliche Wärmebedarfe der Wärmebedarfsstruktur aufsummiert und um mittlere Trinkwarmwasserbedarfe erweitert. Dabei konnte ein Gesamtbedarf von etwa 2800 PJ ermittelt werden. Im Vergleich zum absoluten Wert, der vom BMWi für 2017 veröffentlicht wurde, überschätzt unsere Berechnung den tatsächlichen Wert um etwa 10 % [BMWi, 2017]. Im Mittel kann daher der Wärmebedarf des deutschen Gebäudebestands mit Hilfe örtlich und zeitlich aufgelöster Gebäudesimulationen abgeschätzt werden.

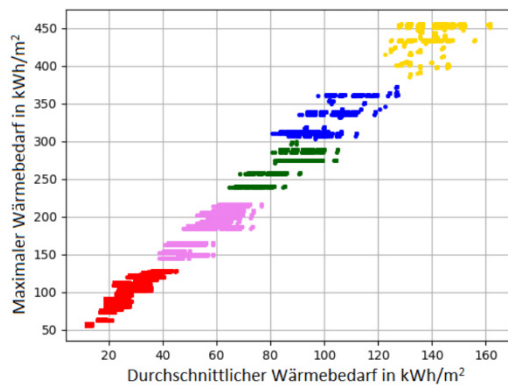


Abbildung 7: Gebäudecluster zur Abbildung des mittleren Gebäudewärmebedarfs in Deutschland.

## ERKENNTNISSE DER ARBEIT

Durch die Klassifizierung der Gebäudebestandsstruktur mit anschließenden energetischen Simulationen repräsentativer Wohngebäude konnte der örtlich und zeitlich aufgelöste Wärmebedarf des Gebäudebestands abgeschätzt werden.

Der Vergleich unterschiedlicher Stadt- und Landkreise weist darauf hin, dass eine bedarfsgerechte Auslegung von Wärmepumpensystemen möglich ist. Die erzielten Simulationsergebnisse können aus Sicht der Autoren als Eingangsdaten zur bedarfsgerechten Auslegung von Wärmepumpensystemen verwendet werden, die eine maßgeschneiderte Auslegung dieser Systeme erlauben. In folgenden Untersuchungen sollten tiefgehendere Klassifizierungen zeigen, inwiefern die erzielten 3520 Jahressimulationsergebnisse zur Vereinfachung von Auslegungsverfahren weiter reduziert werden können.

Zusätzlich sollte in folgenden Diskussionen der Kühlbedarf analysiert werden, da dieser in Zukunft zur Erhöhung des Komforts in Gebäuden eine zentralere Rolle einnehmen wird.

## DANKSAGUNG

Dieses Vorhaben wird aus Mitteln des Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE) gefördert (EFRE-0500029).

## LITERATUR

- Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V., 2017, Auswertungstabellen zur Energiebilanz Deutschland: 1990 bis 2016, 2017.
- Beckman, W. A. et al., 1994, TRNSYS The most complete solar energy system modeling and simulation software, *Renewable Energy* (5), 486-488.
- BMWi, 2018, Energieeffizienz in Zahlen, URL: [https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/energieeffizienz-in-zahlen-2018.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=12](https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/energieeffizienz-in-zahlen-2018.pdf?__blob=publicationFile&v=12).

- Cischinsky, H., 2016, Datenerhebung Wohngebäudebestand., ISBN-Nr.: 978-3-941140-71-4.
- Deutscher Wetterdienst, 2020. URL <https://www.dwd.de/DE/leistungen/testreferenzjahre/testreferenzjahre.html>.
- DIN EN 12831, 2017. Energetische Bewertung von Gebäuden - Verfahren zur Berechnung der Normheizlast.
- DIN EN 15450, 2007. Heizungsanlagen in Gebäuden - Planung von Heizungsanlagen mit Wärmepumpen.
- Infas360, 2020, URL: <https://infas360.de/infasgeodaten/gebaeuedaten/>
- Institut für Wohnen und Umwelt, 2015. Deutsche Wohngebäudetypologie: Beispielhafte Massnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz von typischen Wohngebäuden. IWU, Darmstadt, 2., ISBN 9783941140479.
- Karlsson, F., 2007, Capacity control of residential heat pump heating systems. Göteborg, Chalmers University of Technology, Dissertation.
- Müller et al. 2016,. AixLib – An open-source Modelica library within the IEA-EBC Annex 60 Framework, *BauSIM* 2016, 3–9.
- Statistische Ämter des Bundes und der Länder, 2015, Endgültige Ergebnisse der Gebäude und Wohnungszählung 2011.
- Statistisches Bundesamt, 2018, Bestand an Wohnungen-Fachserie 5 Reihe 3 - 2017.
- Remmen, P. et al., 2016, Teaser: An open tool for urban energy modelling of building stocks. *Journal of Building Performance Simulation*, 11(1):84–98, 2016.
- Tiller, M., 2019, Modelica by example, URL <https://mbe.modelica.university/front/intro/>
- US Department of Energy's, Building Technology Office, 2020, URL: [www.energyplus.net](http://www.energyplus.net).
- VDI 4645, 2018, Heizungsanlagen mit Wärmepumpen in Ein- und Mehrfamilienhäusern.
- Vering, C. et al., 2019, Vergleich der Jahresarbeitszahlen normativ ausgelegter Wärmepumpensysteme – Teil 2, HLH Band 70, Springer-VDI-Verl.
- Vuolle, M. et al., 2003, Will equation-based building simulation make it?-experiences from the introduction of IDA Indoor Climate And Energy, *Proceedings of 8th IBPSA Conference* 2003.