

Vorwort des Herausgebers

Die Errichtung und die Nutzung von Gebäuden sind nach Schätzungen für weltweit über 30 % des Verbrauchs an Endenergie und für fast 40 % der CO₂-Emissionen verantwortlich. Neben den Wohngebäuden wird in jüngerer Zeit verstärkt auch auf Nichtwohngebäude (NWG) ein Augenmerk gelegt, zu denen beispielsweise Bürogebäude, Schulen und Hochschulen, Krankenhäuser, Rechenzentren und viele weitere Arten zählen. Typischerweise sollen dort sowohl Wärme wie auch Kälte bereitgestellt werden, wobei der jeweilige zeitliche Bedarf im Tages-, Wochen- und Jahresverlauf je nach Gebäudeart und Nutzungsweise des NWG sehr unterschiedlich sein kann. Zudem gilt es, häufig vorhandene Abwärme möglichst effizient zu nutzen, selbst wenn diese bei vergleichsweise niedriger Temperatur anfällt.

Ein Konzept für NWG besteht darin, Wärmepumpen und Eisspeicher zu einem System zu kombinieren. Allerdings liegen bisher hierzu kaum Erfahrungen und belastbare Betriebsdaten vor, die eine zuverlässige Einschätzung erlauben, in welchen Fällen und in welchem Maße ein solches System ökonomisch und ökologisch vorteilhaft sein kann und wie man dieses optimal dimensionieren und führen sollte.

Mit solchen Fragen hat sich der Autor im Rahmen eines Forschungsprojekts „Kombinierte Wärmepumpen-Eisspeicher-Systeme (KomWEisS)“ an meinem Lehrstuhl für Technische Thermodynamik und Transportprozesse (LTTT) im Zentrum für Energietechnik (ZET) der Universität Bayreuth eingehend wissenschaftlich beschäftigt. Er hat hierbei auch den besonderen Vorteil genutzt, dass auf dem Universitätscampus am Gebäude der Technologieallianz Oberfranken (TAO) mit dem dort angesiedelten ZET ein solcher Eisspeicher sowohl für Forschungs- wie auch Versorgungszwecke zur Verfügung steht. Er hatte hierdurch die Gelegenheit, reale Betriebsdaten zu gewinnen und das TAO-Gebäude als Fallbeispiel für seine allgemeiner gefassten Untersuchungen nutzen zu können.

Seine Vorgehensweise, seine hierdurch gewonnenen Ergebnisse und seine auf andere Gebäude übertragbaren Schlussfolgerungen stellt er in diesem Band dar.

Bayreuth, im August 2024

Professor Dr.-Ing. Dieter Brüggemann

Vorwort des Autors

Diese Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter und akademischer Rat auf Zeit am Lehrstuhl für Technische Thermodynamik und Transportprozesse, angesiedelt im Zentrum für Energietechnik der Universität Bayreuth.

Mein besonderer Dank gilt zunächst meinem Doktorvater Prof. Dr.-Ing. Dieter Brüggemann für die langjährige Unterstützung und Betreuung. Durch fachliche Diskussionen sowie das entgegengebrachte Vertrauen und die Freiheit bei der Suche und Ausarbeitung meines Promotionsthemas konnte ich mich im Laufe der Arbeit fachlich und persönlich weiterentwickeln. Des Weiteren möchte ich mich bei Prof. Dr. rer. nat. Robert Honke für das Interesse an meiner Arbeit und die hilfreichen Kommentare bedanken.

Ich möchte mich bei allen Professorinnen und Professoren, Mitgliedern sowie Doktorandinnen und Doktoranden des Graduiertenkollegs „Energieautarke Gebäude“ der TechnologieAllianzOberfranken für die fachlichen Diskussionen herzlich bedanken.

Besonderer Dank gebührt Herrn Dr.-Ing. Andreas König-Haagen für die langjährige Zusammenarbeit und Unterstützung, die auch nach seiner Zeit am Lehrstuhl fortbesteht. Ebenso bedanke ich mich bei Herrn Dr.-Ing. Florian Heberle als Gruppenleiter für seine Förderung und fachlichen Diskussionen. Zudem möchte ich mich bei allen Kolleginnen und Kollegen für das fachliche und menschliche Umfeld sowie den gegenseitigen Austausch bedanken. Bei Herrn Markus Görl und Herrn Michael Hickethier danke ich für die Unterstützung beim Aufbau der erforderlichen Messtechnik. Bei allen Studierenden, die durch ihre Abschlussarbeiten in diesem Themenbereich mitwirken konnten, danke ich darüber hinaus.

Weiterer Dank gilt der Zentralen Technik der Universität, der Viessmann Climate Solutions SE, der Kieback&Peter GmbH & Co. KG und dem staatlichen Bauamt Bayreuth für die Unterstützung bei der Planung und Inbetriebnahme des Verbundsystems.

Abschließend möchte ich allen meinen Dank aussprechen, die mich bei der Anfertigung dieser Arbeit persönlich unterstützt haben. Besonders danke ich meinen Eltern für die gemeinsame Zeit sowie den Zuspruch und die Anerkennung, den von mir gewählten Weg zu verfolgen. Meinem Bruder Leonardo, der vor und während der Erstellung dieser Dissertation motivierend an meiner Seite stand, gilt besonderer Dank. Meiner Familie möchte ich für die Nachsicht insbesondere in den letzten Monaten danken.

Der größte Dank gilt meiner lieben Frau Janice, die mir stets den Rücken freigehalten hat und häufig auf mich verzichten musste. Ihre Geduld, Wertschätzung und Unterstützung tragen einen maßgeblichen Teil zum Gelingen dieser Arbeit.

Kurzfassung

Kombinierte Wärmepumpen-Eisspeicher-Systeme (KomWEisS) ohne solare Unterstützung sind eine vielversprechende Technologie zur Wärme- und Kältebereitstellung in Nichtwohngebäuden (NWG), um bisher ungenutzte Abwärme zu nutzen. Aktuell fehlen jedoch detaillierte Untersuchungen zu den Auswirkungen unterschiedlicher Betriebsstrategien eines KomWEisS im Gesamtkontext des Versorgungssystems sowie Auslegungsroutinen für die Dimensionierung und Integration. Dabei ist für die Bewertung und Optimierung derartiger Systeme die Analyse des Systemverhaltens durch Variationsrechnungen unerlässlich, wofür ein anpassbares, sorgfältig validiertes Modell erforderlich ist.

Daher wird in dieser Arbeit eine umfassende numerische Untersuchung und Bewertung eines KomWEisS im Versorgungssystem eines Forschungsgebäudes der Universität Bayreuth durchgeführt, wobei dreijährige Messdaten verwendet werden. Der 500 m³ fassende Speicher dient als Wärmequelle für eine Wärmepumpe und wird durch das Kühlwassernetz regeneriert, welches die Abwärme liefert, die ebenfalls als direkte Quelle für die Wärmepumpe genutzt werden kann. Für den Speicher wird ein ausführliches numerisches Modell entwickelt, das am Stefan-Problem validiert und mit Langzeitmessungen verglichen wird. Es wird eine Optimierung des Anlagenbetriebs sowie der Dimensionierung durch den Einsatz eines Downhill-Simplex-Algorithmus durchgeführt. Dabei werden unterschiedliche Anlagenkonfigurationen und wirtschaftliche und ökologische Rahmenbedingungen betrachtet. Weiterhin wird die entwickelte Methodik auf andere, vorab selektierte NWG übertragen.

Im Vergleich zu einer konventionellen Wärme- und Kälteerzeugung kann das im Fallbeispiel realisierte System im optimalen Betrieb die CO₂-Emissionen um 37 % senken. Die technisch möglichen Betriebsarten ergeben eine Bandbreite der jährlichen Kosten von 213 bis 287 Tsd. €/a und der CO₂-Emissionen von 148 bis 235 t/a. Die Konfiguration einer optimalen Realisierung zeigt eine hohe Abhängigkeit von den vorherrschenden Randbedingungen. Generell sind für den Einsatz eines Speichers ein hohes Verhältnis zwischen Gas- und Strompreisen sowie niedrige CO₂-Emissionen im Strommix förderlich. In allen betrachteten Regionen kann der KomWEisS-Einsatz zu einer ökologischen Verbesserung sowie einer Verringerung der bedarfsgebundenen Kosten führen. Bei der Übertragung der Methodik auf andere Gebäude zeigt sich, dass die Integration eines KomWEisS einen relativ hohen Wärme- und Kältebedarf voraussetzt, der zusätzlich häufig simultan auftreten muss. Durch reine Klimatisierungsanforderungen kann das geforderte Maß an Gleichzeitigkeit in der Regel nicht erzielt werden, weshalb Formen von Prozesskälte erforderlich sind. Unter den betrachteten Modellgebäuden erfüllen eine kleine und große Schule, ein großes Bürogebäude sowie ein großes Hotel diesen Anforderungen.

Zukünftig kann die entwickelte Methodik auf weitere Liegenschaften wie Rechenzentren oder Krankenhäuser übertragen werden, wobei auch Quartiere berücksichtigt werden können, in welchen unterschiedliche NWG mit Wohngebäuden kombiniert werden.

Abstract

Combined heat pump ice storage systems (ICES) without solar support are a promising technology for the provision of heating and cooling in non-residential buildings (NRB) to utilize so far unutilized waste heat. However, there has been no detailed research on the impact of different operating strategies of an ICES in the overall context of the supply system, as well as design routines for dimensioning and integration. To design, evaluate and optimize such systems, the analysis of the system behavior through variational calculations is essential, for which an adaptable, thoroughly validated model is required.

Therefore, in this work a detailed numerical investigation and evaluation of an ICES in the supply system of a research building at the University of Bayreuth is performed, using three years of measured data. The 500 m³ storage tank serves as a heat source for a heat pump and is regenerated by the cooling water network, which provides waste heat that can also be used as a direct source for the heat pump. A detailed numerical model is developed for the storage tank, which is validated against the Stefan problem and compared with long-term measurement data. An optimization of the plant operation as well as the dimensioning is performed using a downhill simplex algorithm for different plant configurations and economic and environmental framework conditions. Furthermore, the developed methodology is applied to other pre-selected NRBS.

Compared to conventional heating and cooling, the realized system in this case study can reduce CO₂ emissions by 37 % in optimal operation. The technically possible operating modes result in a range of annual costs from 213 to 287 k€/a and CO₂ emissions from 148 to 235 t/a. The configuration of an optimal implementation is highly dependent on the prevailing boundary conditions. Generally, a high ratio between gas and electricity prices and low CO₂ emissions in the electricity mix are beneficial for the application of a storage. In all regions considered, the use of an ICES can result in an ecological enhancement and a reduction in demand-related costs. Applying the methodology to other buildings reveals that the integration of an ICES requires a relatively high demand for heating and cooling, which, in addition, often has to occur at the same time. The required degree of simultaneity generally cannot be achieved through pure air-conditioning requirements, which is why forms of process cooling are necessary. Among the model buildings considered, a small and large school, a large office building and a large hotel fulfill these requirements.

In the future, the developed methodology can be applied to other buildings, such as data centers or hospitals, whereby districts in which different NRBS are combined with residential buildings can be considered as well.

1 Einleitung

Durch den fortschreitenden Klimawandel sowie steigende Preise, insbesondere für fossile Energieträger, gewinnt die Suche nach effizienten Lösungen für die Gebäudeversorgung immer mehr an Relevanz. Derzeit ist der Gebäudesektor für fast ein Drittel des weltweiten Endenergieverbrauchs verantwortlich [1]. Ferner entfallen auf diesen ca. 37 % der globalen CO₂-Emissionen, wenn sowohl die Bau- als auch die Nutzungsphase berücksichtigt werden [2]. Die Internationale Energieagentur (IEA) geht davon aus, dass diese Zahlen weiter steigen werden, da seit 2010 der durchschnittliche jährliche Zuwachs an Nutzfläche von 2,5 % den sinkenden durchschnittlichen Energieverbrauch pro m² von 0,5 bis 1 % kontinuierlich übersteigt [3]. Neben der Bereitstellung von Wärme rückt zunehmend der Bedarf an Kälte in den Fokus. Allein zwischen 1990 und 2019 haben sich die dadurch bedingten CO₂-Emissionen fast verdreifacht [4]. Nach Angaben der IEA ist die Raumkühlung der am schnellsten wachsende Gebäudeendenergieverbrauch mit einer jährlichen Wachstumsrate von über 3 % in den nächsten drei Jahrzehnten, die damit achtmal höher ist als die des Wärmebedarfs in den vergangenen 30 Jahren [5]. Darüber hinaus gibt es insbesondere in Nichtwohngebäuden (NWG) beträchtliche Niedertemperatur-Abwärmequellen, z. B. Server oder sonstige Geräte, die derzeit aufgrund fehlender technischer Lösungen nicht genutzt werden [6]. Daher werden effizientere Lösungen benötigt, um sowohl den Wärme- als auch den Kältebedarf im Gebäudesektor auf eine wirtschaftlichere und ökologischere Weise zu decken.

Eine kombinierte Wärme- und Kälteversorgung durch Nutzung der im Gebäude anfallenden Abwärme stellt einen vielversprechenden Ansatz zur Reduzierung des Primärenergieverbrauchs dar. Ghouali et al. [7] weisen jedoch auf das Problem des geringen Verhältnisses von gleichzeitigem Heiz- und Kühlbedarf hin, welches in realen Liegenschaften aufgrund der zeitlichen Diskrepanz häufig auftritt. Erschwerend kommt hinzu, dass innerhalb des Versorgungssystems komplexe Wechselwirkungen bestehen sowie die Abwärme meist auf einem sehr niedrigen Temperaturniveau anfällt. Daher haben Speichersysteme in letzter Zeit vermehrt Beachtung gewonnen, da sie das zeitliche Ungleichgewicht ausgleichen können, wobei die Auswahl der Speichermaterialien aufgrund des Temperaturniveaus begrenzt ist. Aus diesem Grund ist die Abwärmenutzung im Gebäudesektor weniger verbreitet als in industriellen Prozessen [7].

In den vergangenen Jahren gab es dennoch eine Vielzahl von Forschungsaktivitäten, um eine Kombination mit dem Gebäudesektor zu ermöglichen. Wang et al. [8] untersuchten die Leistungsfähigkeit einer Wärmepumpe (WP) in Kombination mit einem Erdsondenfeld zur Nutzung von industrieller Niedertemperaturabwärme (30 bis 50 °C), wodurch die Wärmeversorgung von Gebäuden verbessert werden kann. Egging-Bratseth et al. [9] untersuchten die Abwärmenutzung einer Eishalle und einer Müllverbrennungsanlage mithilfe einer saisonalen Erdsondenanlage. Hierdurch konnte eine Kostensenkung von bis zu 10 % bei gleichzeitiger Senkung der CO₂-Emissionen um bis zu 37 % bei der Versorgung eines Fernwärmesystems mit

fünf verschiedenen Gebäudetypen erzielt werden. Die Nutzung der Abwärme eines Rechenzentrums mithilfe eines Wassertanks in Verbindung mit einem Erdsondenspeicher wird von Li et al. [10] untersucht, was zu einer Senkung der Betriebskosten eines Campus-Heizsystems um 6 % und einer Reduzierung der CO₂-Emissionen um 8 % führt. Ein gemeinsames Merkmal aller Arbeiten ist die Nutzung geothermischer Bohrungen infolge der hohen erforderlichen Speicherkapazität, da sensible Wasserspeicher bei der geringen Temperaturspreizung aufgrund der geringen Speicherdichte nicht ausreichend sind. Zu den hohen Bohrkosten kommt erschwerend hinzu, dass in immer mehr Ländern strenge rechtliche Rahmenbedingungen für das Bohren von Erdlöchern verhängt werden.

Eine vielversprechende Ergänzung stellen Latentwärmespeicher dar, die aufgrund der Ausnutzung des Phasenwechsels eine hohe Speicherdichte aufweisen. Insbesondere Wasser ist ein kostengünstiges Speichermaterial, das im Gegensatz zu anderen Phasenwechselmaterialien (PCM, engl.: Phase Change Material) zyklenstabil, nicht toxisch, korrosiv oder brennbar ist. Ebenso stellt Wasser aus ökologischer Sicht das vorteilhafteste Material für Latentwärmespeicher dar [11]. Aufgrund dieser entscheidenden Vorteile hat die Erforschung von Eis-Energiespeichersystemen (EES) vorwiegend im Gebäudesektor in den vergangenen Jahren zunehmend an Bedeutung gewonnen. So haben Rohde et al. [12] ein integriertes Heiz- und Kühlsystem für einen Gebäudekomplex untersucht, bei dem Erdwärmesonden mit einem EES kombiniert werden. Für eine umfassende Übersicht zu experimentellen und numerischen Untersuchungen von Erdwärmepumpen in Verbindung mit thermischen Speichersystemen wird auf Zhu et al. [13] verwiesen.

Darüber hinaus werden in letzter Zeit vermehrt Bestrebungen unternommen, Eisspeicher ohne die zusätzliche Unterstützung von Bohrungen zu realisieren. Erste Versuche eines EES ohne Bohrlochunterstützung wurden bereits 1980 von Shipper [14] für die kombinierte Wärme- und Kälteversorgung in einem Wohnhaus durch Nutzung der Abwärme einer Kälteanlage untersucht. Philippen et al. [15] stellten einen kleinen EES für ein Mehrfamilienhaus in der Schweiz vor, bei dem zusätzlich zur Solarwärme die Abwärme aus der Abluft der Lüftungsanlage zur Regeneration des Speichers genutzt werden kann. In weiteren Studien wird der Gebrauch von EES zu Heizzwecken in mehreren Gebäudetypen untersucht, angefangen von Wohngebäuden [16], über Mehrfamilienhäuser [17] hin zu Kindergärten [18]. Überdies untersuchten verschiedene Autoren den Einsatz von EES für reine Kälteanwendungen [19] in Bürogebäuden [20], Krankenhäusern [21] und Hotel-, Restaurant- und Bürogebäuden sowie Einkaufszentren [22] ohne die Möglichkeit, diese mit der Wärmeversorgung zu koppeln.

Die Optimierung von Regelungsstrategien und -mechanismen [23–25] gewinnt in letzter Zeit immer mehr an Bedeutung, wobei die EES hauptsächlich für die Kälteversorgung eingesetzt werden. Über den Betrieb eines Systems zum Heizen und Kühlen gibt es derzeit dahingegen noch keine Fachliteratur. Bei Systemen zur Wärmebereitstellung mit solarer Unterstützung wird lediglich versucht, vorwiegend in der wärmeren Jahreshälfte möglichst viel Energie in den

Speicher zu leiten, um diesen in der kälteren Jahreshälfte möglichst umfangreich nutzen zu können [26]. Bei NWG, bei denen im Gegensatz zu Wohngebäuden auch im Winter Abwärme anfällt, die abgeführt werden muss, kann diese Betriebsweise jedoch nicht übernommen werden. Erschwerend kommt hinzu, dass Eis-Energiespeichersysteme in der Regel in Kombination mit verschiedenen anderen Heiz- und Kühlanlagen installiert werden, die in komplexen gegenseitigen Wechselwirkungen stehen.

Wie Henn et al. [27] umfassend zeigten, steht die Speicherdimensionierung in enger Wechselwirkung mit der Energieerzeugung und der Betriebsstrategie eines komplexen Verbundsystems. Für die Auslegung, Bewertung und Optimierung einer kombinierten Wärme- und Kälteversorgung ist daher eine Analyse des Systemverhaltens mithilfe von Variationsrechnungen unerlässlich. Dies erfordert ein anpassbares Modell, welches sich für Systemsimulationen eignet und sorgfältig validiert ist. Da die Simulationen in der Regel über einen langen Zeitraum (z. B. ein Jahr) durchgeführt werden, muss auf den Detaillierungsgrad geachtet werden, um eine akzeptable Rechenzeit zu gewährleisten. Komplexe Mechanismen wie die gleichzeitige Be- und Entladung erschweren dabei eine ausreichende Abbildung in stark vereinfachten Modellen. Die aktuellen Forschungsarbeiten auf dem Gebiet der Entwicklung detaillierter numerischer EES-Modelle werden durch experimentelle Arbeiten wie von Abdelrahman et al. [28] ergänzt. Eine erfolgreiche Skalierung auf größere Systeme ermöglicht Variationsrechnungen hinsichtlich der Anlagendimensionierung. Bei Wohngebäuden, welche einen vergleichbaren Heiz- und Kühlbedarf haben, verfügen die Hersteller dabei über Erfahrungswerte für die Dimensionierung. Für NWG hingegen, bei denen je nach Verwendungszweck sehr unterschiedliche Anforderungen gelten, gibt es in der Literatur keine systematischen Methoden zur Auslegung.

Um diese Lücke zu schließen, wird im Rahmen dieser Arbeit ein kombiniertes Wärmepumpen-Eisspeicher-System (KomWEisS) zur Nutzung gebäudeintern anfallender Abwärme im Verbund mit anderen Anlagen untersucht. Im Gegensatz zu bisherigen Arbeiten ist eine gleichzeitige Be- und Entladung möglich, wobei keine solare Unterstützung benötigt wird, welche nur eine saisonale Verfügbarkeit aufweist und üblicherweise in derartigen Systemen verwendet wird. Zur Regeneration wird Abwärme genutzt, die gebäudeintern über das ganze Jahr hinweg anfällt.

Das Ziel dieser Arbeit ist, die folgenden wissenschaftlichen Fragestellungen zu beantworten:

- Welchen Einfluss haben die vorherrschenden Randbedingungen auf die Optimierung und unter welchen ist die Integration eines KomWEisS generell zu empfehlen?
- Kann der Einsatz eines KomWEisS zu ökonomischen und ökologischen Verbesserungen führen und wie kann eine willkürfreie multikriterielle Bewertung vorgenommen werden?
- Welche Auswirkungen haben unterschiedliche Betriebsweisen? Gibt es je nach Jahreszeit unterschiedliche Optima? Ist ein gezielter Eisaufbau im Frühjahr empfehlenswert? Ist eine häufige Anpassung der Betriebsstrategie empfehlenswert?

- Wie sollten die WP und der Speicher dimensioniert werden? Sollte zusätzlich zu dem KomWEisS ein BHKW verbaut werden?
- Wie kann ein möglichst breites Spektrum an unterschiedlichen Gebäuden systematisch untersucht werden?
- Welche Charakteristik muss der Gebäudeverbrauch aufweisen, um Vorteile zu erzielen, welche Gebäude entsprechen diesen Anforderungen und wie kann für diese ein optimaler Speicher identifiziert werden?
- Wie kann die zukünftige Leistungsfähigkeit eines KomWEisS beurteilt werden und welchen Einfluss haben dabei künftige Entwicklungen der Randbedingungen?
- Wie können die rechenintensiven Ergebnisse dieser Arbeit auch unter zukünftigen, aktuell schwer prognostizierbaren Entwicklungen genutzt werden?

Um diese Fragen zu beantworten, ist die Arbeit wie folgt gegliedert:

Unterschiedliche Konzepte zur Wärme- und Kältebereitstellung sowie thermische Speicher werden in Kapitel 2 beschrieben. Überdies werden verfügbare Technologien und Betriebsweisen von Eis-Energiespeichern sowie Ansätze zur Modellierung und Optimierung vorgestellt. Abgeschlossen wird dieses Kapitel durch eine Kategorisierung von Nichtwohngebäuden sowie der Definition der im Rahmen dieser Arbeit betrachteten Gebäude.

In Kapitel 3 werden die entwickelte Methodik zur Bewertung und Optimierung der Integration von Eis-Energiespeichersystemen in Versorgungssysteme von Nichtwohngebäuden sowie die Vorgehensweise zur Übertragbarkeit auf andere Gebäude vorgestellt.

Eine Übersicht der numerischen Modelle und deren Validierung ist in Kapitel 4 zu finden.

Kapitel 5 enthält eine Beschreibung des im Fallbeispiel betrachteten Verbundsystems mit Verbrauchsdaten über einen Zeitraum von drei Jahren sowie eine Charakterisierung des KomWEisS.

Die Verifizierung und Validierung der Modelle sowie die ermittelten Lastprofile für verschiedene Gebäudetypen und deren Eignung zur Vorabsimulation werden in Kapitel 6 präsentiert.

Die Ergebnisse der Variationsrechnungen werden in Kapitel 7 vorgestellt und diskutiert. Dabei werden der Anlagenbetrieb und verschiedene Ansätze zur Optimierung der Anlagenfahrweisen des Fallbeispiels analysiert. Zudem werden unterschiedliche Anlagenkonfigurationen und -dimensionierungen betrachtet, für welche jeweils die optimale Größe sowie eine Sensitivitätsanalyse numerisch berechnet wird. Abschließend wird die entwickelte Methodik auf andere Gebäudetypen angewendet.

Aus den Ergebnissen dieser Arbeit werden in Kapitel 8 Empfehlungen für die Bewertung, den Betrieb sowie die Integration von Eis-Energiespeichersystemen anhand des Fallbeispiels und weiterer Typen von Nichtwohngebäuden zusammengefasst. Zudem wird das Potenzial für zukünftige Realisierungen eingeschätzt.

Abgeschlossen wird die Arbeit durch eine Zusammenfassung mit einem Ausblick in Kapitel 9.

2 Energieversorgung von Nichtwohngebäuden

In diesem Kapitel werden unterschiedliche Konzepte zur Wärme- und Kältebereitstellung vorgestellt. Neben den Erzeugern wird zudem auf thermische Speicher eingegangen. Ebenso werden Eis-Energiespeicher im Kontext der Gebäudeenergieversorgung detailliert betrachtet. Neben den verfügbaren Technologien und Betriebsweisen werden dabei Ansätze zur Modellierung und Optimierung vorgestellt. Abgeschlossen wird das Kapitel durch eine Kategorisierung von Nichtwohngebäuden sowie der Definition der im Rahmen dieser Arbeit betrachteten Gebäude.

2.1 Versorgungskonzepte

In diesem Abschnitt wird zunächst ein allgemeiner Überblick der zum Einsatz kommenden Erzeuger vorgestellt sowie die Funktionsprinzipien der im weiteren Verlauf betrachteten Anlagen erklärt. Abgeschlossen wird der Abschnitt durch eine Übersicht zu thermischen Energiespeichern.

2.1.1 Wärme- und Kälteerzeugung

Die Wärmebereitstellung in NWG wird häufig in Verbundsystemen aus unterschiedlichen Anlagen realisiert. Eine Kategorisierung der Hauptwärmeerzeuger nach der Baualtersklasse ist in Tabelle 2.1 zu finden. Die Daten stammen aus einer aktuellen Studie aus dem Jahr 2022, welche vom Institut Wohnen und Umwelt GmbH [29] durchgeführt wurde. Ein Großteil von ca. 78 % der Altbauten und ca. 72,5 % sämtlicher NWG werden zentral durch Brennstoff versorgt, wobei der größte Anteil von über 92 % mit Heizkesseln erfolgt. Andererseits beträgt der Anteil der zentralen Versorgung mit Brennstoff bei Neubauten lediglich ca. 54,1 %. Dahingegen nimmt bei diesen der Anteil, der mit Nah- oder Fernwärme oder dezentral durch Brennstoff versorgt wird, zu. Ferner ist ein Anstieg der zentral elektrischen Versorgung, welche hauptsächlich durch Wärmepumpen erfolgt, zu verzeichnen. Der WP-Anteil von insgesamt ca. 3,5 % in Neubau-NWG fällt im Vergleich zu neu gebauten Wohngebäuden auffallend niedrig aus, bei welchen der WP-Anteil ca. 39 % beträgt. Lediglich ca. 1,9 % der betrachteten relevanten Gebäude des Gebäudeenergiegesetzes (GEG) verfügen über eine Solarthermieanlage. [29]

Tabelle 2.1: Kategorisierung der Hauptwärmeerzeugung in NWG nach Baualtersklasse [29].

Hauptwärmeerzeuger (Kategorie)	Alle NWG in %	Altbau (bis 1978) in %	Neubau (ab 2010) in %
zentral elektrisch	3,2 ± 1,2	(1,5 ± 1,0)	4,2 ± 1,3
... davon Wärmepumpen	71,9 ± 14,6	88,2 ± 8,6	82,3 ± 11,9
... davon zentral elektrische Wärmeerzeuger	(28,1 ± 14,5)	(11,8 ± 8,0)	(17,7 ± 10,4)
dezentral elektrisch	3,5 ± 1,5	2,0 ± 0,6	1,1 ± 0,7
zentral Brennstoff	72,5 ± 2,8	78,0 ± 3,0	54,1 ± 10,9
... davon Heizkessel	92,1 ± 2,0	93,1 ± 1,9	93,8 ± 3,2
... davon Kraft-Wärme-Kopplungsanlage (z. B. BHKW)	3,4 ± 1,0	3,7 ± 1,4	(4,5 ± 2,6)
... davon Wärmepumpe (mit Brennstoff betrieben)	4,4 ± 1,7	3,1 ± 1,3	(1,8 ± 1,3)
... davon sonstige zentrale Wärmeerzeuger mit Brennstoff	0,1 ± 0,04	0	(0,1 ± 0,1)
dezentral Brennstoff	5,2 ± 1,6	4,8 ± 2,2	(21,7 ± 12,0)
Nah- oder Fernwärme	15,7 ± 2,3	13,7 ± 2,1	18,9 ± 7,8

Dabei wurden mehr als die Hälfte der Wärmeerzeuger vor 2001 installiert, wodurch die übliche technisch-wirtschaftliche Nutzungsdauer von 20 Jahren zum Zeitpunkt der Studie [29] überschritten wurde. Ebenso weisen ca. 25 % der Anlagen eine Lebensdauer von weniger als 10 Jahren auf. Verglichen mit Bauteilen der Gebäudehülle, bei welchen die jährliche Modernisierungsrate seit 2010 bei ca. 0,7 % liegt, fällt die Rate bei Anlagen zur Wärmebereitstellung deutlich höher aus. So wurden seit 2010 durchschnittlich 2,3 % der Wärmeerzeuger pro Jahr modernisiert, wodurch die Identifizierung von geeigneten neuen Konzepten zur effizienten Wärmeversorgung von Relevanz ist. [29]

Im Rahmen dieser Arbeit werden Verbundsysteme aus Gasbrennwertkesseln, gasbetriebenen Blockheizkraftwerken sowie Kompressionswärmepumpen betrachtet, deren Funktionsweisen im Weiteren erläutert werden.

Wärmepumpe

Eine Kompressionswärmepumpe dient zur Anhebung von thermischer Energie von einem niedrigen auf ein höheres Temperaturniveau unter Einsatz mechanischer Arbeit. Hierfür wird der Umgebungsluft, dem Erdreich oder dem Grundwasser Wärme entzogen und über den Verdampfer dem Arbeitsmedium zugeführt, siehe Abbildung 2.1. Dabei wird das Arbeitsmittel des Kreisprozesses isobar erwärmt. Der gesättigte Dampf wird durch den Verdichter anschließend im Idealfall isentrop auf ein höheres Druckniveau unter der Zufuhr elektrischer Leistung verdichtet. Durch den Kompressionsprozess erwärmt sich das Arbeitsmedium. Über den Kondensator wird der überhitzte Dampf isobar gekühlt und vollständig verflüssigt, wobei die Energie auf das Heizwasser übertragen wird. Durch das Drosselventil wird das flüssige Arbeitsmedium auf den ursprünglichen Druck des Verdampfers isenthalp unter Entropiezunahme entspannt und dabei abgekühlt, wodurch sich der Kreis schließt. Somit kann ein Vielfaches der zugeführten elektrischen Energie als Wärme bereitgestellt werden. Demgegenüber kann bei einer direkten Nutzung des Stroms zu Heizzwecken maximal die eingesetzte Energiemenge zur Wärmebereitstellung genutzt werden.

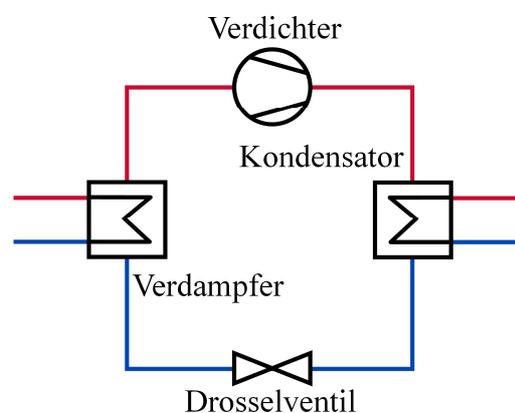


Abbildung 2.1: Schematische Darstellung einer Kompressionswärmepumpe.

Gasbrennwertkessel

In einem Gasbrennwertkessel (GK) wird die im Erdgas gebundene chemische Energie in Wärme umgesetzt. Hierzu wird das zugeführte Gas über einen Brenner verbrannt, wodurch ein von Wasser durchströmter Wärmeübertrager im Brennraum erwärmt wird, siehe Abbildung 2.2. Im Abgas entsteht bei der Verbrennung wie bei konventionellen Heizkesseln Wasserdampf. Zum einen ist ein leichter Wasseranteil im Erdgas bereits in den Lagerstätten vorhanden, welcher an den Verdichterstationen der langen Transportwege durch Beimengung gesteigert wird. Zum anderen entsteht dieser bei der Verbrennung von Methan, welches den Hauptbestandteil von Erdgas darstellt. Anstatt das Abgas samt Wasserdampf mit noch hoher Temperatur ungenutzt an die Atmosphäre abzugeben, wird dieses bei Brennwertkesseln über die Rücklaufleitung des Kessels geführt. Durch das darin zirkulierende kältere Wasser kann der Wasserdampf abgekühlt und kondensiert werden, wenn die Temperatur unter den Taupunkt der Abgase sinkt. Die dabei freiwerdende Kondensationsenthalpie wird zur Bereitstellung von Wärme verwendet, womit die Effizienz steigt.

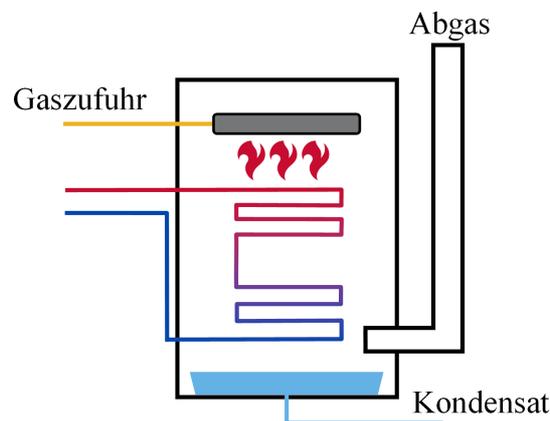


Abbildung 2.2: Schematische Darstellung eines Gasbrennwertkessels.

Blockheizkraftwerk

Ein Blockheizkraftwerk (BHKW) dient der kombinierten Bereitstellung von elektrischer Energie und Wärme. Dabei kommt das Prinzip der Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) zum Einsatz. Der erste und zweite Hauptsatz der Thermodynamik schreiben vor, dass selbst unter idealen Bedingungen lediglich ein begrenzter Anteil der im Brennstoff gespeicherten Energie in technische Arbeit umgewandelt werden kann. Zur Abgabe der im Prozess entstandenen Entropie muss ein Großteil der zugeführten thermischen Energie des Kreisprozesses mit geringem Temperaturniveau an die Umgebung abgeführt werden. Gegenüber konventionellen Verfahren zur Stromerzeugung wird bei der KWK die Verbrennungswärme zurückgewonnen und zur Wärmebereitstellung genutzt. In einem gasbetriebenen BHKW wird über einen Verbrennungsmotor der Generator zur Stromerzeugung angetrieben, siehe Abbildung 2.3. Die Abwärme des Kühlwassers und des Abgases wird über Wärmeübertrager an das Heizwassernetz als Nutzwärme