

WIE ABWÄRME AUS RECHENZENTREN DIE WÄRMEWENDE IN DEUTSCHLAND VORANBRINGEN KANN

Benjamin Ott¹, Mira Weber², Peter Radgen³

Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung der Universität Stuttgart^{1,3},
Heißbrühlstraße 49A, 70565 Stuttgart, Deutschland, +49 (0) 711 685 87826¹,
benjamin.ott@ier.uni-stuttgart.de¹, <https://www.ier.uni-stuttgart.de/>

Deutsche Unternehmensinitiative Energieeffizienz e.V., Kirchstraße 21, 10557 Berlin,
Deutschland, +49 (0) 176 30 75 60 46², mira.weber@deneff.org², <https://deneff.org/>

Kurzfassung: Rechenzentren gelten als wichtiges Rückgrat der Digitalisierung und haben im Zuge der Coronapandemie weiter an Bedeutung gewonnen. Während des Betriebes fallen große Mengen an Abwärme an, die bisher ungenutzt in die Umwelt abgegeben werden. An dieser Stelle setzt das Projekt „EnEff:Wärme: DC-Heat“ mit „Bytes2Heat“ an, um die Abwärme von Rechenzentren einer sinnvollen Nutzung zuzuführen. Im Rahmen des Projekts wurden im ersten Schritt anhand von Experteninterviews die bestehenden Herausforderungen ermittelt. Im zweiten Schritt wurden darauf aufbauend agile Innovationsworkshops durchgeführt, um zukunftsweisende Lösungen für die Abwärmenutzung aus Rechenzentren zu entwickeln. Auf diese Weise kann die vorhandene Abwärme durch das Voranbringen der Abwärmenutzung einen Beitrag zur Wärmewende in Deutschland aber auch weltweit leisten. Im dritten Schritt wurde ein Simulations- und Berechnungsmodell erstellt, mit dem die technischen und wirtschaftlichen Auswirkungen der Abwärmenutzung aufgezeigt werden können. Gleichzeitig dient dieses Modell und die Bytes2Heat-Plattform als Unterstützungsgrundlage für Abwärmeprojekte. Je nach Rahmenbedingungen konnte gezeigt werden, dass eine wirtschaftliche Abwärmenutzung möglich ist. Auf der Bytes2Heat-Plattform werden die erarbeiteten Lösungsprodukte, die in Zusammenarbeit mit den Projektpartnern iterativ weiterentwickelt werden, zukünftig öffentlich bereitgestellt.

Keywords: Abwärmenutzung, Rechenzentrum, Wärmewende, Experteninterviews, Innovationsworkshop, Kostenvergleich, Prototypen, Bytes2Heat

1 Einleitung und Motivation

Rechenzentren können als Rückgrat der Digitalisierung in den Energiesystemen und den Anwendungen im Bereich der Industrie einen großen Beitrag zu Effizienzsteigerungen und Energieeinsparungen leisten. Durch den Ausbau von Glasfaseranschlüssen, 5G-Mobilnetzen, Online-Angeboten und dem starken Wachstum von IoT-Anwendungen haben sie eine enorme, wachsende Bedeutung in der Gesellschaft und der Wirtschaft. Es kann davon ausgegangen werden, dass noch mehr Rechenzentren errichtet werden, welche entsprechend mehr Platz und elektrische Anschlussleistung benötigen [1]. Bereits 2015 lag der Stromverbrauch deutscher Rechenzentren bei etwa 12 Mrd. kWh, was wiederum ca. zwei Prozent des gesamten deutschen Strombedarfs entspricht [2, 3]. Bis zum Jahr 2020 stieg der Stromverbrauch kontinuierlich auf 16 Mrd. kWh an [4]. Wie in Abbildung 1 dargestellt, ist

tendenziell mit einem weiteren Anstieg des Stromverbrauchs zu rechnen, wobei Schätzungen zufolge der Stromverbrauch von 2015 bis 2025 um mehr als 60 % ansteigen könnte [5]. Allein im Rhein-Main-Gebiet mit dem „DE-CIX“ als Europas größtem Netzknoten soll der Strombedarf von 1 Mrd. kWh im Jahr 2017 auf bis zu 4 Mrd. kWh im Jahr 2025 ansteigen [6]. Zur Erhöhung der Klimaverträglichkeit und Reduzierung der Umweltauswirkungen setzen viele Rechenzentren bereits elektrischen Strom aus erneuerbaren Energiequellen ein. Auch dies ändert nichts an der Tatsache, dass die beim Betrieb eines Rechenzentrums zugeführte elektrische Leistung vollständig in Wärme umgewandelt wird und meistens ungenutzt als Abwärme in die Umgebung abgegeben wird. Zwar wurden Rechenzentren in den letzten Jahren durch moderne IT-Hardware und neue Kühlkonzepte effizienter, allerdings blieben die Einsparungen hinter den Wachstumsraten der Rechnerkapazitäten zurück, so dass der Stromverbrauch weiter angestiegen ist. [7]

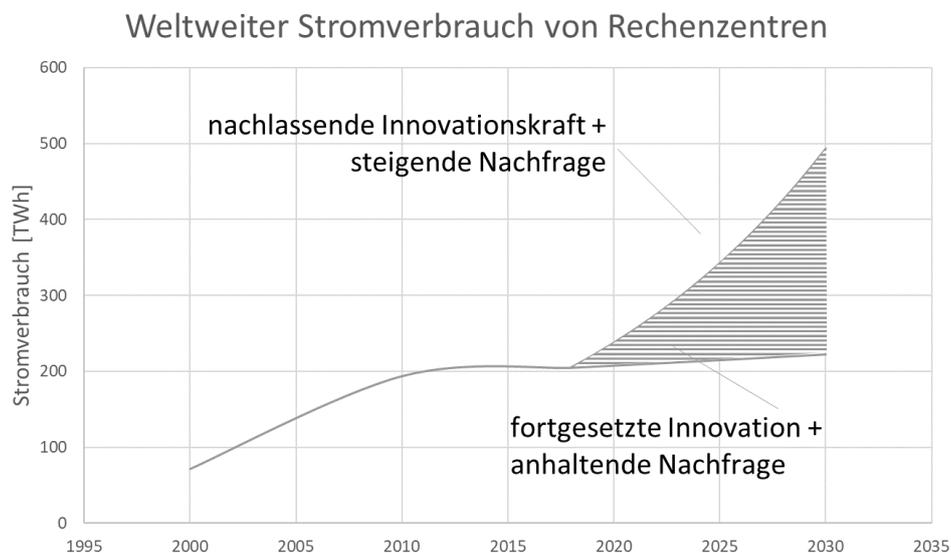


Abbildung 1: Weltweiter Stromverbrauch von Rechenzentren seit 2000 mit einem Ausblick auf verschiedene Szenarien ab 2019 [8]

Die Chance diese „CO₂-arme“ Abwärme zur Dekarbonisierung im Wärmesektor einzusetzen, sollte nicht verschenkt werden. Der Anteil der erneuerbaren Energien betrug 2020 im Stromsektor 45,3 %, wohingegen im Wärmesektor nur ein Anteil von 15,6 % erzielt wurde. [9] Typischerweise können bis zu 85 % der im Rechenzentrum verbrauchten Strommengen als Abwärme wieder genutzt werden [10]. Die Wiederverwendung der unvermeidbar anfallenden Abwärme würde einen Beitrag für Nachhaltigkeit und Klimaschutz im Wärmesektor leisten. Denn würde das in Deutschland vorhandene Potenzial vollständig ausgeschöpft, so könnten jährlich fast 2 Millionen Tonnen Kohlenstoffdioxid jährlich eingespart werden. Hierzu müsste ein Teil, der meist auf fossilen Energieträgern basierenden Wärmeversorgung der Gebäude und gewerblichen Anwendungen, durch die anfallenden Abwärme ersetzt werden. [7]

Die Abwärme aus luftgekühlten Rechenzentren ist mit durchschnittlich 35 °C für die meisten Wärmeanwendungen zu niedrig und würde beispielsweise für die Einspeisung in herkömmliche Wärmenetze nicht ausreichen. Eine Möglichkeit zur Anhebung des Temperaturniveaus ist die Aufwertung der Abwärme mit Hilfe von Wärmepumpen. Ein großer Vorteil der Abwärme aus Rechenzentren ist ihre kontinuierliche Verfügbarkeit, verbunden mit geringen saisonalen Schwankungen der Auslastung. Des Weiteren liegt das Temperaturniveau der Abwärme mit 35 °C im Vergleich zu anderen typischen Wärmequellen

für Wärmepumpen wie die Umgebungsluft (im Winter 2020/2021 durchschnittlich 1,8 °C) und der oberflächennahen Geothermie (ganzjährig 7-12 °C) deutlich höher [11, 12]. Damit wäre die Abwärme aus Rechenzentren für Betreiber von Wärmepumpen die deutlich attraktivere Wärmequelle. Deren Wirtschaftlichkeit hängt im großen Maße von zwei Faktoren ab. Zum einen von der Höhe der notwendigen Temperaturerhöhung durch die Wärmepumpe und zum anderen von den Energiekosten. Dazu gehören neben den Stromkosten auch die Brennstoffkosten für andere alternative Energiequelle zur Wärmebereitstellung, mit denen die durch Wärmepumpen aufgewertete Abwärme im Wettbewerb steht. In Deutschland dominiert bei den privaten Haushalten der Energieträger Erdgas für die Beheizung der Wohnungen mit einem Anteil von 43 % (2020) [13, 14]. Um sowohl die Abwärmequelle „Rechenzentrum“ als auch die Abwärmesenke „Wärmekunde“ zur Nutzung von Abwärme zu motivieren, müssen diese Kenntnis über die wirtschaftlichen Auswirkungen dieses Nutzungskonzepts haben. Aus diesem Grund wurde ein Simulationsmodell der Abwärmeauskopplung, -aufwertung und -nutzung erarbeitet. Durch die Gegenüberstellung mit dem am häufigsten eingesetzten Energieträger Erdgas kann ein sinnvoller Vergleich der Kosten erfolgen, der den Stakeholdern eine solide Grundlage für die Entscheidung bietet. Im Zuge des Projektes „EnEff:Wärme: DC-Heat“ werden alle verbleibenden Herausforderungen ermittelt, um darauf aufbauend innovative Lösungskonzepte zu entwickeln und erproben. [7]

2 Methodik und Vorgehensweise

In der Literatur zur Abwärmenutzung besteht wenig Forschung zu Hindernissen bei der Abwärmenutzung aus Rechenzentren, speziell in Krisensituationen wie der COVID-19-Pandemie.

2.1 Bestimmung der Herausforderung

Für den vorliegenden Forschungsgegenstand bietet sich eine qualitative Forschung an, die einen vertieften Einblick und ein umfassendes Verständnis ermöglicht, besonders wenn nur begrenzt Forschungsergebnisse vorliegen, auf die zurückgegriffen werden kann [15, 16]. Im ersten Schritt wurde für die Datenerhebung daher ein qualitativer Forschungsansatz gewählt.

Für qualitative Forschungszwecke sind zufällige Wahrscheinlichkeitsstichproben ungeeignet. Die Stichprobe muss vielmehr eine detaillierte Exploration des Untersuchungsgegenstands ermöglichen. Bei der Auswahl der Stichprobe war der Beitrag zu relevanten Erkenntnissen für die Forschung ausschlaggebend [17]. Fundierte Kenntnisse in den Bereichen Abwärmenutzung und Rechenzentren wurden hierbei als besonders relevant für die vorliegende Untersuchung identifiziert. Aus diesem Grund wurden Experten aus unterschiedlichen Stakeholdergruppen in die Stichprobe aufgenommen. Für einen Rundumblick wurden Experten aus fünf Bereichen interviewt: Rechenzentren nahe Organisationen, Wärmeabnehmer, technische Lösungsanbieter, Kommunen sowie juristische Dienstleister und Sonstige. Um eine angemessene Analyse allgemeiner Muster zu ermöglichen, war nicht nur die Qualität, sondern auch die Anzahl der Interviews ausschlaggebend für den Erfolg eines interviewbasierten Forschungsprojekts [18]. Daher wurden im Laufe der empirischen Arbeit schrittweise insgesamt 30 Interviews durchgeführt [18–20]. Die heterogene Stichprobe setzte sich wie folgt zusammen: 24 % Rechenzentren

nahen Organisationen, 28 % Wärmeabnehmer, 21 % technischen Lösungsanbieter, 17 % Kommunen und 10 % aus der Gruppe Juristen und Sonstige.

Im Zuge der qualitativen Forschung wurde als Datenerhebungsmethode ein semi-strukturiertes leitfadengestütztes Experteninterviewformat mit offenen Fragen gewählt. Dieses Interviewformat ermöglichte es individuell auf das Wissen der Befragten und die Interessen der unterschiedlichen Stakeholdergruppen einzugehen, gezielt Fragen zu stellen sowie nicht nur auf das Wissen der verschiedenen Interviewpartner, sondern auch auf die aus den Interviews bereits gewonnenen Inhalte einzugehen [21, 22]. Die potenziellen Interviewpartner wurden per E-Mail kontaktiert und die Durchführung der Interviews erfolgte zwischen Juni und September 2021 per Videokonferenz mit einer Dauer von jeweils ca. einer Stunde. Die Interviews orientierten sich dabei an vier Leitfragen:

1. Welche Faktoren verhindern die Abwärmenutzung aus Rechenzentren?
2. Welche Faktoren beschleunigen die Abwärmenutzung aus Rechenzentren?
3. Was sind Best-Practices im Bereich der Abwärmenutzung aus Rechenzentren?
4. Welche konkreten Endprodukte und Lösungstools wären sinnvoll, um die Abwärmenutzung aus Rechenzentren wirtschaftlich nutzbar zu machen?

Mit diesen Schlüsselfragen wurden die Hemmnisse und Bedürfnisse bei der Abwärmenutzung aus Rechenzentren betrachtet, um darauf aufbauend mögliche Lösungsansätze zu entwickeln.

Im vorliegenden Forschungsvorhaben wurden induktive Überlegungen genutzt, um die erhobenen Daten zu analysieren [18]. Die Experteninterviews wurden während der Interviews protokolliert und anschließend in einer Microsoft Exceltabelle erfasst. Diese Erfassung diente als Grundlage für die Kodierung, Analyse sowie interpretativen Schlussfolgerungen der Daten. Die Erhebung, Kodierung und Kategorisierung der Daten erfolgten gleichzeitig [23]. Dieser konstant vergleichende Ansatz signalisierte, wann die Stichprobenziehung eingestellt werden konnte. Ausreichende Daten sind erhoben, wenn weitere Daten nur noch dazu tendieren, bereits bestehende Erkenntnisse zu bestätigen. Dieser Punkt der theoretischen Sättigung wurde nach der Erhebung und Analyse von 30 Interviews erreicht [18]. Für die Analyse der erhobenen Daten wurden die von Gioia, Corley und Hamilton [24] vorgeschlagenen Schritte angewandt und Codes induktiv ohne ein vordefiniertes Kodierschema gebildet [25]. Im ersten Analyseschritt wurden die gesammelten Daten in Kategoriecodes erster Ordnung (offenes Kodieren) organisiert, die dann in abstraktere Kategorien zweiter Ordnung (axiales Kodieren) und schließlich in noch abstraktere aggregierte theoretische Dimensionen (selektives Kodieren) zusammengefasst wurden. Diese Dimensionen stellen eine empirisch fundierte Kategorisierung der analysierten Codes dar, die dann in einer Datenstruktur mit unterstützenden Farbcodes für ähnliche Kategorien veranschaulicht wurden [19, 24]. Mit einem iterativen Ansatz wurde durch den ständigen Vergleich und Aggregieren von Daten, Codes und Kategorien eine Liste von Codes erster und zweiter Ordnung sowie eine endgültige Datenstruktur erstellt [22, 24–26].

2.2 Entwicklung der Lösungsansätze

Aufbauend auf den in den Experteninterviews gesammelten Daten wurden vier Innovationsworkshops zur Abwärmenutzung aus Rechenzentren konzipiert, in denen mögliche Lösungsansätze entwickelt und diskutiert werden sollten. Die einzelnen Workshops

sollten dabei unabhängig voneinander durchgeführt werden können, damit eine zielführende Lösungsentwicklung unabhängig von den Teilnehmern der einzelnen Workshops ermöglicht wird. Damit alle relevanten Themenbereiche für die Lösungsentwicklung der Abwärmenutzung berücksichtigt werden, wurden die Workshops entlang der entwickelten Datenstruktur durchgeführt. Bei der Zusammensetzung der Workshopteilnehmer wurde besonders darauf geachtet, dass Akteure aus allen relevanten Stakeholdergruppen anwesend sind, damit diese als interdisziplinäre Teams innovative Lösungen erarbeiten können.

Das Format agiler Workshops wurden als Innovationsansatz gewählt, um in einem Co-Development-Prozess gemeinsam mit den relevanten Stakeholdern markt- und produktorientierte Lösungen für die Abwärmenutzung aus Rechenzentren zu entwickeln. Diese Workshopausrichtung ermöglicht es unterschiedliche Lösungsansätze und entsprechende erste Prototypen zu skizzieren, die kontinuierlich verbessert und später zu integrierten Lösungsansätzen zusammengefasst werden. Die Lösungsentwicklung wurde hier durch den Einsatz unterschiedlicher Tools unterstützt. Mit Dotvotings wurden sichergestellt, dass die für alle Stakeholdergruppen relevanten Hindernisse adressiert und Ideen konkretisiert werden. Mit Capture&Shares wurde während der Lösungsentwicklung Feedback zu skizzierten Konzepten eingeholt und durch World-Cafés Ideen mit neuer Sichtweise weiterentwickelt und verbessert. Anhand von vordefinierten Personas wurde regelmäßig reflektiert, ob die Bedürfnisse der relevanten Zielgruppen berücksichtigt und somit nutzerfreundliche Produkte geschaffen werden. Mit Ideation Canvas wurden Ideen zu ersten Prototypen konkretisiert und dabei eine ganzheitliche Betrachtungsweise sichergestellt und durch die Erstellung von Scribbles wurde ein klares Verständnis der Prototypen geschaffen. Die Ergebnisse wurden jeweils durch Schlusspräsentationen zusammengefasst sowie mithilfe von Fotoprotokollen von Post-Its und Flipcharts bzw. auf Online-Whiteboards festgehalten.

Nach den jeweiligen Workshops wurde ein Ideenscreening durchgeführt und die entwickelten Konzepte übersichtlich aufbereitet und zusammengestellt. Dabei wurden ähnliche Ideen zusammengefasst und jeweils deren wichtigsten Merkmale herausgestellt. Diese Ergebnisse wurden durch die wichtigsten Workshopkenntnisse ergänzt und gemeinsam mit den aggregierten Prototypen auf einem Ergebnisposter festgehalten. Hiermit soll weiteres Feedback eingeholt und bei der Weiterentwicklung der Lösungsansätze die richtigen Schwerpunkte gesetzt werden.

2.3 Simulationsmodell für den Vergleich zwischen der Abwärmenutzung und einer Erdgasheizung

Das Ziel des Rechenmodells besteht darin, sowohl die Betreiber eines Rechenzentrums als auch weitere involvierte Stakeholder, wie z. B. Energieversorgungsunternehmen, Contractoren aber auch die Endkunden, über die technischen und wirtschaftlichen Folgen der Nutzung der Abwärme aus Rechenzentren anhand von konkreten Berechnungen mit einem Ausblick in die Zukunft zu informieren. Im Hinblick auf zwei Zielgruppen, zum einen die Rechenzentren als Wärmequelle und die Energieversorger/Contractoren als Dienstleister und zum anderen die Wärmeabnehmer, wird das Berechnungsmodell zweiteilig aufgebaut sein. Auf der einen Seite erfolgt eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung für die Wärmequelle und die Übertragung zum Endkunden. Auf der anderen Seite erfolgt auch für den Wärmeabnehmer in Form eines privaten Haushaltes ein Kostenvergleich der Abwärmenutzung zur in Deutschland

häufig eingesetzten Erdgasheizung. Abgerundet wird diese Betrachtung um ökologische Auswirkungen, insbesondere durch die Treibhausgasemissionen während des Betriebs der beiden technologischen Ansätze. Sowohl die Datenerfassung als auch -verarbeitung und Ergebniserzeugung erfolgen in einem Tabellenkalkulationsprogramm (z. B. Microsoft Excel). Zunächst werden alle relevanten Daten zum Rechenzentrum und der Wärmeverteilung erfasst. Dazu gehören unter anderem die IT-Leistung der Serverhardware, die Auslastung des Rechenzentrums, der nutzbare Anteil der anfallenden Wärme sowie die Austrittstemperatur des Kühlmittels (Wärmetransportmedium) aus dem Rack. Der schematische Aufbau eines Rechenzentrums ist in Abbildung 2 dargestellt. Im Modell sind die Berechnungsgrundlagen für die Luft- und Flüssigkeitskühlung integriert, wobei im ersten Fall sogenannte „Rear Door Heat Exchanger“ die Kühlung des Luftstroms übernehmen. Für die Wärmeauskopplung sind vereinfacht zwei verschiedene Positionen möglich. Die Abwärme könnte sowohl vor als auch nach der mechanischen Kältemaschine ausgekoppelt werden. Die relevanten Parameter für die Wärmenetzeinspeisung sind das Temperaturniveau der Wärmeverteilung, die Einspeisedauer, die räumliche Distanz zwischen der Wärmequelle und -senke und die topografische Beschaffenheit der für die Wärmeleitung vorgesehenen Trasse. In Abhängigkeit der Temperaturdifferenz zwischen der ausgekoppelten Abwärme und der Temperatur in der Wärmeleitung ist ggf. eine Temperaturanhebung der Abwärme über eine Wärmepumpe notwendig. Hierfür sind die technischen Daten und Kennfelder der „Viessmann Vitocal 350-HT Pro“ (Nenn-Wärmeleistung: 56,6 bis 351,5 kW, Kältemittel: R1234ze) hinterlegt, da sie besonders für die Abwärmennutzung geeignet ist [27].

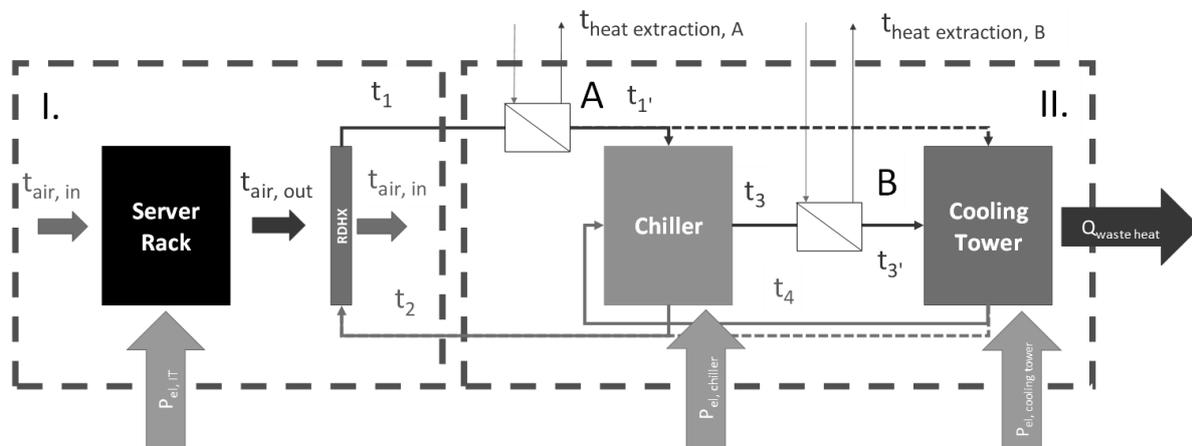


Abbildung 2: Schematischer Aufbau eines Rechenzentrums bestehend aus dem Serverraum (I.) und der Kühltechnik (II.)

Daneben werden die wirtschaftlichen Rahmenbedingungen abgefragt, wie z. B. der Strompreis und die notwendigen Parameter für die Wirtschaftlichkeitsberechnung (kalkulatorischer Zinssatz, Nutzungszeit, Wärmepreis etc.). Zusätzlich können etwaige Zuschüsse durch Förderprogramme, wie z. B. die „Bundesförderung für Energie- und Ressourceneffizienz in der Wirtschaft“ in Deutschland mitberücksichtigt werden. Davon ausgehend werden die Investitionen und Betriebskosten berechnet, um anschließend daraus den Gewinn für die involvierten Unternehmen und die Gesamtkosten und die Treibhausgasemissionen für die Endverbraucher zu ermitteln.

Um einen sinnvollen Vergleich zwischen der Wärmeversorgung aus Rechenzentren und einer alternativen Lösung mit einer Erdgasheizung zu erzielen, wird zusätzlich ein „Musterhaushalt“

definiert. Bezüglich der Klassifizierung der Wohngebäudetypen (Baualtersklasse, Größenklasse) und der Energiekennwerte erfolgt eine Orientierung anhand der Definitionen und Studienergebnissen des „Institut Wohnen und Umwelt“ [28]. Als Referenztechnologie dient das Gas-Brennwert-Heizgerät bzw. -Kombigerät „Viessmann Vitodens 200-W“ (Nenn-Wärmeleistung: 2,5 bis 32 kW, automatische Verbrennungsregelung mit einem Modulationsbereich bis 1:13) [29]. Für diese Referenztechnologie werden ebenfalls die Investitionen und Betriebskosten ermittelt. Anschließend können sowohl die Kostenstruktur als auch Treibhausgasemissionen für beide Technologien verglichen werden.

Die spezifischen CO₂-Emissionsfaktoren wurden auf Basis der regulatorischen Vorgaben berechnet. Für Erdgas wird ab 2030 mit einem Volumenanteil von 100 % H-Gas und einem Emissionsfaktor von 201,94 g CO₂/kWh gerechnet [30–32]. Im Falle des Stromsektors erfolgt eine Orientierung an den Vorgaben des Klimaschutzgesetzes der Bundesrepublik Deutschland, wobei im Jahr 2020 der Emissionsfaktor schätzungsweise 366 g CO₂/kWh betrug [33, 34]. Die Energiekosten sind sowohl für Strom als auch Erdgas bis 2020 hinterlegt [35]. Ausgehend davon erfolgt eine Preissteigerung unter Annahme einer konstanten Inflationsrate und Energiepreissteigerung. Zusätzlich wird ein Preisaufschlag im Zuge des Brennstoffemissionshandelsgesetz in Abhängigkeit von den zuvor ermittelten Emissionsfaktoren mitberücksichtigt [36].

3 Ergebnisdarstellung

3.1 Ergebnisse und Diskussion der Experteninterviews

Aus den Experteninterviews bildeten sich übergreifend fünf Überkategorien heraus: die kommunikative, betriebswirtschaftliche, technische, rechtliche und sonstige Kategorie. Diese kristallisierten sich bei den Antworten auf die Leitfragen zu den Hemmnissen, Bedürfnissen, Beschleunigern und Best-Practices bei der Abwärmenutzung aus Rechenzentren heraus.

Im Folgenden wird auf die zehn am häufigsten genannten Hemmnisse bei der Abwärmenutzung aus Rechenzentren unter Angabe der Hemmniskategorie eingegangen. Gleichzeitig werden mögliche Lösungsansätze dargestellt, die den Abbau der entsprechenden Barriere unterstützen können. Die drei am häufigsten erwähnten Hemmnisse sind: Das niedrige Temperaturniveau der Abwärme (technisch), die fehlende Kommunikation und das Silodenken¹ der notwendigen Umsetzungspartner (kommunikativ) sowie der hohe Investitionsbedarf (betriebswirtschaftlich). Ergänzend dazu wurden die lange Amortisationszeit und geringe Rendite (betriebswirtschaftlich), die Sicherstellung der kontinuierlichen Wärmeabnahme/ -lieferung (technisch), die entstehenden Abhängigkeiten und Verpflichtungen (rechtlich), der fehlende Ausbau der Wärmenetze (technisch), das fehlende energietechnische und wirtschaftliche Wissen (betriebswirtschaftlich), die Verfügbarkeit unzähliger Abwärmequellen (technisch) sowie die fehlende Förderung von elektrischem Strom für Wärmepumpen (rechtlich) als Gründe benannt.

¹ Unter Silodenken wurde hier insbesondere das isolierte Denken der potenziellen Umsetzer verstanden, welches gemeinsame Projekte behindert und sich dadurch negativ auf Innovationsprozesse auswirkt.

Im Folgenden wird auf die Bedürfnisse der handelnden Akteure bei der Abwärmenutzung aus Rechenzentren eingegangen. Zwischen den Bedürfnissen und Hemmnissen bei der Abwärmenutzung aus Rechenzentren besteht eine Korrelation. Aus der Gesamtbetrachtung und Analyse der Bedürfnisse aller Stakeholdergruppen ist übergreifend zu erkennen, dass die folgenden vier Hauptbedürfniskategorien ungefähr gleich häufig genannt werden: technisch, betriebswirtschaftlich, rechtlich/ regulatorisch und kommunikativ. Neben der Gesamtbetrachtung ist zudem die stakeholder-spezifische Bedürfnisbetrachtung aufschlussreich. Betriebswirtschaftliche Fragestellungen spielen insbesondere bei Rechenzentren, Lösungsanbietern und Abwärmeabnehmern eine große Rolle, kommunikative Bedürfnisse wurden von allen Stakeholdergruppen außer den juristischen Diensten genannt, technische Bedürfnisse dominieren bei den Wärmeabnehmern und scheinen auch für Rechenzentren, Kommunen und juristische Dienste wichtig zu sein. Rechtliche Bedürfnisse stechen besonders bei juristischen Diensten hervor, wurden aber auch von Lösungsanbietern und Kommunen erwähnt. Aufgrund der sehr unterschiedlichen Bedürfnisverteilungen zwischen den Stakeholdergruppen, muss diese Bedürfnisvielfalt bei der Entwicklung von Lösungen für die Abwärmenutzung aus Rechenzentren berücksichtigt werden.

3.2 Ergebnisse aus den Workshops

Die Bedürfnisvielfalt der Stakeholder wurde durch das Einbeziehen aller relevanten Stakeholdergruppen in den Innovationsprozess berücksichtigt. Zwei der vier Workshops wurden bereits durchgeführt. Der Fokus des ersten Workshops lag auf der Kommunikation. Im Gegensatz dazu fokussierte sich der zweite Workshop auf die betriebswirtschaftliche Perspektive. Ziel der Workshops war jeweils die Entwicklung von innovativen Lösungsansätzen, um die kommunikativen bzw. betriebswirtschaftlichen Hemmnisse rund um die Abwärmenutzung aus Rechenzentren abzubauen.

Zu den entwickelten Lösungsansätzen aus dem ersten Workshop gehörte ein Wärmenetzwerk, eine Matching-Plattform, ein Quartier Services sowie ein Symbiose Campus. Das Matching-Tool, welches Wärmeanbieter und Wärmenachfrager zusammenbringen soll, war in diesem Workshop besonders prominent vertreten, da diese Idee von 3 Kleingruppen gleichzeitig und unabhängig voneinander entwickelt wurde. Die Idee des Wärmenetzwerks ist, dass das Wärmenetz als Dreh- und Angelpunkt von gemeinsamen Klimaschutzanstrengungen betrachtet wird. Unternehmen schließen sich in diesem Zusammenhang zusammen, um gemeinsam Energie zu sparen und dabei das Thema der Abwärmenutzung aus Rechenzentren mit zu berücksichtigen. Auf dem Symbiose Campus profitieren alle Akteure durch ihre Nähe wechselseitig voneinander. Die Idee des Quartiers Services lehnt sich in gewisser Weise an diesen Campusgedanken an. Die Abwärme aus Rechenzentren soll hier nicht nur in das Quartiers-Energiekonzept integriert, sondern ein regionales Services-Konzept geschaffen werden. Hierin sollen lokale Dienstleistungen miteinander verknüpft werden. Regionales Datenhosting, Telekommunikation, Lieferdienste bis hin zur Kinderbetreuung und auch die Abwärmenutzung aus Rechenzentren würden hier beispielsweise als Dienstleistungen angeboten. Zu den Hauptkenntnissen aus dem ersten Workshop gehörte das Anliegen des Zusammenbringens von Akteuren durch eine Art intelligenten Vermittler; dass Akteure durch räumliche Nähe voneinander profitieren sowie die Wahrung der Anonymität von Akteuren (insb. von Rechenzentren).

Die entwickelten Lösungsansätzen aus dem zweiten Workshop umfassten einen Quick-Check, ein Joint Venture oder Contracting-Modell, bei dem Abwärme gespeichert wird, ein Reallabor und eine Planungsrichtlinie. Mit einer schnellen Abschätzung der Wirtschaftlichkeit von Abwärmeprojekten wurde für den Quick-Check beispielsweise die Analyse von Kosten und Energiebilanzen, der Vergleich von Alternativprodukten sowie die Distanzberechnung erarbeitet. Bei dem Lösungsansatz von Fair Heat, dem Joint Venture oder Contracting-Modell, wurde das Netzwerk als Handelsplattform, die Speicherung von Abwärme und das Zwischenschalten eines neutralen Moderators hervorgehoben. Beim Reallabor als Vorzeigeprojekt für ein wassergekühltes Co-Location Rechenzentrum wurde insbesondere eine Standardisierung der Kühltechnologie betont. Die Idee der Planungsrichtlinie für das Baugeschehen einer Kommune berücksichtigte primär das Meldeverfahren von neuen Bauvorhaben, die wegweisende Funktion für Synergien-Nutzungen sowie eine zentrale Wärmeplanung. Zu den Haupterkenntnissen aus dem zweiten Workshop gehörte der Wunsch nach einem zentralen Vermittler sowie Vorzeigeprojekten, die Ermöglichung einer zentralen Planung und schnellen Wirtschaftlichkeitsberechnung, sowie das Nutzen vorhandener Synergien.

3.3 Resultate der Modellrechnung

Für die Modellrechnung wird von einer IT-Leistung von 2.500 kW_{el}, mit einer Auslastung von 70 % und einer Wärmeauskopplung von 60 % der zugeführten elektrischen Energie ausgegangen. Es wird eine Luftkühlung mit „Rear Door Heat Exchanger“ (RDHX) eingesetzt, wobei die Austrittstemperatur aus dem Rack 35 °C beträgt. Im Falle einer Auskopplung der Abwärme vor der Kältemaschine ergibt sich ein Temperaturniveau von 28 °C. Es wird außerdem angenommen, dass 60 % der durch den Serverbetrieb entstehenden Abwärme ausgekoppelt werden kann. Die Einspeisung soll in ein lokales Nahwärmenetz mit einer Vorlauftemperatur von 50 °C und einer Einspeisedauer von 4.500 h/a erfolgen. Dazu sollen innerhalb einer Einspeisestation die notwendigen Wärmepumpen installiert werden. Zwischen der Wärmequelle und den -senken soll eine 1.250 m lange Wärmeleitung unter unbefestigtem Gelände errichtet werden. Auf Basis der Angaben beträgt die nutzbare Abwärmeleistung 1.050 kW_{th}, welche zusammen mit der elektrischen Leistung von 208 kW_{el} der Wärmepumpen eine Gesamtleistung von 1258 kW_{th} ergibt ($COP = 6,05$). Abzüglich der Verteilungsverluste in Höhe von ca. 15 % (188 kW_{th}) ergibt sich ein jährlicher nutzbarer Wärmestrom von $(1258 - 188) \text{ kW} \cdot 4500 \text{ h/a} = 4.815 \text{ MWh/a}$. Mit dieser Wärmemenge kann der Wärmebedarf von 485 Reihenhäusern mit einer Fläche von jeweils 120 m² gedeckt werden, welche mit einem Gebäudestandard nach 1995 errichtet wurden (94,1 kWh/(m²a)).

Das gesamte Investitionsvolumen für Wärmeauskopplung, Wärmepumpen und Wärmeverteilung beläuft sich auf ca. 2,1 Mio. € (netto), zusätzlich muss jeder einzelne Haushalt mit Kosten von ca. 5.900 € (brutto) für die hauseigene Fernwärmestation rechnen. Mit dem Förderprogramm „Bundesförderung für Energie- und Ressourceneffizienz in der Wirtschaft - Zuschuss“ kann ein Zuschuss in Höhe von ca. 320.000 € genutzt werden, womit sich die Investition auf ca. 1,8 Mio. € reduziert. An dieser Stelle wird davon ausgegangen, dass nur ein Akteur die notwendige Infrastruktur zwischen Wärmesenke und -quelle errichtet und betreibt. Hierbei sollen eine Nutzungszeit bzw. ein Betrachtungszeitraum von 15 Jahren gelten. Bei einem Stromverbrauch von 936 MWh/a und Bezug zu Konditionen von Industriekunden (> 18,10 ct/kWh) liegen die Stromkosten bei ca. 170.000 €/a (netto). Deren

Anteil an den gesamten Betriebskosten betragen ca. 80 % und haben damit die größte Auswirkung auf die Wirtschaftlichkeit der Wärmeversorgung auf Basis der Abwärme aus Rechenzentren. Der Rechenzentrenbetreiber soll einen konstanten Wärmepreis von 10 €/MWh erhalten, während der Endkundenpreis bei 85 €/MWh liegt. Damit erzielt der Rechenzentrenbetreiber über den Betrachtungszeitraum einen Umsatz von ca. 700.000 € (netto) und der Energieversorger von ca. 6,4 Mio. € (netto). Insgesamt ergibt sich eine Amortisation nach 10 Jahren mit der Förderung und nach 13 Jahren ohne Förderung. Je nach Anforderungen an die Amortisation kann es sich um einen attraktiven Business Case handeln. Insgesamt würden über den Nutzungszeitraum etwa 2.950 t CO₂ emittiert und im Vergleich zu einem alternativen Erdgaskessel 14.300 t CO₂ eingespart werden.

Unter Berücksichtigung von marktüblichen Preisen für den Grund- und Dienstleistungspreis bei leitungsgebundener Wärmeversorgung ergeben sich für den Musterhaushalt zu Beginn Heizkosten von ca. 1.400 €/a (brutto). Würde dagegen eine Gasheizung zur Wärmeversorgung genutzt, betragen die Investitionen (ohne Pufferspeicher) ca. 4.500 € (brutto) und die anfänglichen jährlichen Heizkosten ca. 1.300 €/a (brutto). In Abbildung 3 werden für die beiden Technologien die kumulierten Gesamtkosten für den gesamten Betrachtungszeitraum von 15 Jahren dargestellt. Zwar ist der Unterschied zu Beginn vernachlässigbar gering, nimmt mit der Laufzeit aber stetig zu. Ab dem sechsten Jahr besitzt das Konzept der Abwärmenutzung aus Rechenzentren einen Kostenvorteil gegenüber dem Erdgaskessel.

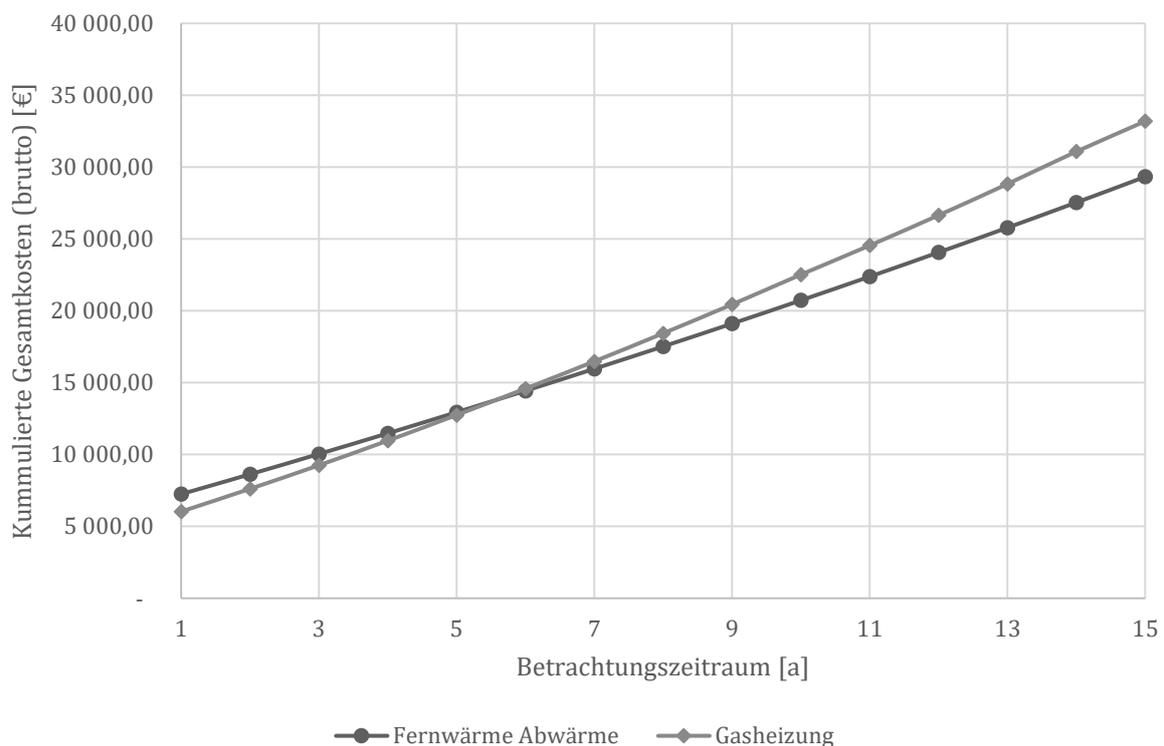


Abbildung 3: Kumulierte Gesamtkosten für einen Haushalt über den Betrachtungszeitraum

Nach 15 Jahren ergibt sich infolgedessen ein Kostenunterschied von knapp 4.000 € über den gesamten Betrachtungszeitraum. Hierfür sind mehrere Faktoren verantwortlich. Zum einen wird für Erdgas von einem höheren Preisanstieg (+ 1 %/a) ausgegangen, welcher durch den steigenden CO₂-Preis (65 €/t CO₂ ab 2031) zusätzlich verschärft wird. Gleichzeitig wurde

unterstellt, dass der Emissionsfaktor von Strom im Zuge der Umsetzung des Klimaschutzplans abnimmt. Daneben ist geplant die EEG-Umlage für den Strom bis 2023 komplett abzuschaffen, was in diesem Fall jedoch nicht modelliert wurde. Infolgedessen nimmt die Preisdifferenz tendenziell zu und dürfte sich in Zukunft weiter verstärken. An dieser Stelle bestehen aber Unsicherheiten hinsichtlich der zukünftigen Preisentwicklungen auf den Energiemärkten und den regulatorischen Vorgaben. Vor allem könnte eine signifikante Abweichung vom unterstellten Höchstpreis von 65 € pro Tonne CO_{2eq} den Handlungsdruck und die Situation deutlich verändern. Daneben ist dieses Modell an vielen Stellen stark vereinfacht. So wurden bei den Investitionen nur die Materialkosten unter Vernachlässigung der Arbeitskosten berücksichtigt. In der aktuellen Marktsituation ist eher mit Kostensteigerungen in Bezug auf die Versorgung mit den notwendigen Materialien und Fachkräften zu rechnen. Für dieses Beispiel wurde aufgrund des Temperaturniveaus der Abwärme die Warmwassererzeugung nicht analysiert. Mit diesem Rechenbeispiel kann gezeigt werden, dass die Abwärmenutzung aus Rechenzentren nicht nur aus ökologischer, sondern auch ökonomischer Perspektive sinnvoll sein kann. Dies hängt jedoch von den jeweiligen Randbedingungen ab. Schon bei geringfügig geringerer Leistung und größerer Leitungslänge steigen die Investitionen stark an und die erzielbaren Umsätze bei gleichbleibendem Arbeitspreis verhindern eine zeitnahe Amortisation der Investitionen.

4 Zusammenfassung und Ausblick

In Experteninterviews konnten neben technischen und wirtschaftlichen Herausforderungen auch kommunikative und rechtliche Hemmnisse ermittelt werden. In Innovationsworkshops wurden und werden im Rahmen des Projektes entlang dieser Kategorien Lösungskonzepte für eine erfolgreiche Abwärmenutzung aus Rechenzentren entwickelt. In einem Rechenmodell konnte gezeigt werden, dass die Abwärmenutzung aus Rechenzentren aus ökologischer und ökonomischer Sicht zur Dekarbonisierung der Wärmeversorgung eingesetzt werden kann. Aufgrund der Vereinfachungen sollte jedoch in jedem Fall eine genauere Berechnung in Abhängigkeit der jeweiligen Situation erfolgen. Trotzdem kann mit dieser Musterrechnung ein Überdenken bei den leitenden Verantwortlichen angestoßen werden. Um die Qualität des Simulationsmodells zu verbessern, sind weitere Anpassungen und ein Abgleich mit potenziellen Abwärmeprojekten im Zuge der Projektrealisierung geplant.

Die erarbeiteten Prototypen werden im Austausch mit den relevanten Stakeholdern iterativ weiterentwickelt. Mit deren Hilfe sollen zukunftsweisende Leuchtturmprojekte angestoßen und validiert werden. Mithilfe eines Fragebogens soll aufbauend auf den Interviewergebnissen eine erneute Befragung der Teilnehmer und weiterer Akteure zur Verifikation und Validierung der Zwischenergebnisse erfolgen. Gleichzeitig sollen zukünftig alle Produkte und Informationen auf der Bytes2Heat-Plattform zur Verfügung gestellt werden.

5 Danksagung

Wir bedanken uns herzlich bei unseren Projektförderern und -unterstützern sowie unseren Verbundpartnern. Die einzelnen Verbundpartner sind die Deutsche Unternehmensinitiative Energieeffizienz e.V., Innovative WärmeNetze GmbH sowie die Institute für VWL und Recht und Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung der Universität Stuttgart.

Das Projekt wird gefördert vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages. Ein besonderer Dank gilt den folgenden Unternehmen, die das Projekt unterstützen: BFE Institut für Energie und Umwelt, Danfoss, DC-Datacenter-Group, ENGIE Deutschland und E.ON Energy Solutions.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

6 Quellenverzeichnis

- [1] U. Ostler, *Der (EU-) Rechenzentrumsmarkt bricht Rekorde*. Datacenter-Wachstum gemessen in Megawatt. <https://www.datacenter-insider.de/der-eu-rechenzentrumsmarkt-bricht-rekorde-a-950851/> (Aufgerufen 16. Januar 2022).
- [2] Wissenschaftlicher Dienst des Deutschen Bundestages, „Energieverbrauch von Rechenzentren“. Sachstand, Berlin WD 8 - 3000 - 041/19, 2019. <https://www.bundestag.de/resource/blob/651446/d226ff9ff67a3c29d893859121cfc5fe/WD-8-041-19-pdf-data.pdf>. (Aufgerufen 16. Januar 2022).
- [3] BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V., *Entwicklung des Stromverbrauchs nach Verbrauchern: Letztverbrauch Strom nach Verbrauchergruppen in Deutschland*. https://www.bdew.de/media/documents/Nettostromverbrauch_nach_Verbrauchergruppen_Entw_10J_online_o_ja_ehrlich_Ki_03052021.pdf (Aufgerufen 16. Januar 2022).
- [4] R. Hintemann, „Energiebedarf der Rechenzentren steigt trotz Corona weiter an“. Cloud Computing profitiert von der Krise, 2020. https://www.borderstep.de/wp-content/uploads/2021/03/Borderstep_Rechenzentren2020_20210301_final.pdf. (Aufgerufen 16. Januar 2022).
- [5] Wissenschaftlicher Dienst des Deutschen Bundestages, „Energieverbrauch von Rechenzentren“. Sachstand, Berlin WD 8 - 3000 - 070/21, 2021. <https://www.bundestag.de/resource/blob/863850/423c11968fcb5c9995e9ef9090edf9e6/WD-8-070-21-pdf-data.pdf>. (Aufgerufen 13. Februar 2022).
- [6] Hessischer Rundfunk hr-iNFO, *Boom der Rechenzentren in Rhein-Main - Fluch oder Segen?* <https://www.ardaudiothek.de/episode/netzwelt/boom-der-rechenzentren-in-rhein-main-fluch-oder-segen/hr-info/89637990/> (Aufgerufen 16. Januar 2022).
- [7] B. Ott, M. Weber, P. Radgen, T. Pauthner, S. Scherz und C. Noll, „Mit Bytes2Heat die Wärmewende vorantreiben“, *DataCenter-Insider*, S. 28–32, 2021. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.datacenter-insider.de/nachhaltigkeit-im-rechenzentrum-d-61545309d3487/>
- [8] D. Turek und P. Radgen, „Drivers for future data centre demand – historical trends and prospects for 2030: Final Report“, IER, Universität Stuttgart, 2021.
- [9] Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik, „Erneuerbare Energien in Zahlen“, Dessau-Roßlau, 2021. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/erneuerbare-energien/erneuerbare-energien-in-zahlen#uberblick>. (Aufgerufen 10. November 2021).
- [10] M. Thomas, „Stromverbrauch, Energieeffizienz und Fördermassnahmen im Bereich der Rechenzentren: Bericht des Bundesrates in Erfüllung des Postulates 13.3186 von Nationalrat“, 2015. <https://www.news.admin.ch/newsd/message/attachments/40632.pdf>. (Aufgerufen 10. Februar 2022).
- [11] Deutscher Wetterdienst, „Deutschlandwetter im Winter 2020/21“. Pressemitteilung, 2021. https://www.dwd.de/DE/presse/pressemitteilungen/DE/2021/20210226_deutschlandwetter_winter2020_2021.pdf;jsessionid=877052FF8D38BEFF95BBAB38135FA806.live21062?__blob=publicationFile&v=5. (Aufgerufen 17. Januar 2022).
- [12] Bayerisches Landesamt für Umwelt, „Oberflächennahe Geothermie“, Augsburg, UmweltWissen – Klima & Energie, 2013. https://www.lfu.bayern.de/buerger/doc/uw_107_oberflaechennahe_geothermie.pdf. (Aufgerufen 17. Januar 2022).
- [13] Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz, „Zahlen und Fakten: Energiedaten: Nationale und internationale Entwicklungen“, Berlin, 2021. https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Binaer/Energiedaten/energiedaten-gesamt-xls.xls?__blob=publicationFile&v=95. (Aufgerufen 20. Januar 2022).

- [14] BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V., „Wie heizt Deutschland 2019?: BDEW-Studie zum Heizungsmarkt“, Berlin, 2019. https://www.bdew.de/media/documents/Pub_20191031_Wie-heizt-Deutschland-2019.pdf. (Aufgerufen 10. Februar 2022).
- [15] D. Hülst, „Grounded Theory“, 2011. http://www.fallarchiv.uni-kassel.de/backup/wp-content/plugins/old/lbg_chameleon_videoplayer/lbg_vp2/videos/huelst_grounded_theory.pdf. (Aufgerufen 25. Januar 2022).
- [16] M. B. Miles und A. M. Huberman, *Qualitative data analysis: An expanded sourcebook*. Thousand Oaks, Calif.: Sage, 2008.
- [17] J. Ritchie und J. Lewis, Hg., *Qualitative research practice: A guide for social science students and researchers*. London: Sage, 2014.
- [18] B. G. Glaser und A. L. Strauss, *The discovery of grounded theory: Strategies for qualitative research*. New York, NY: Aldine, 1967.
- [19] A. L. Strauss und J. M. Corbin, *Grounded theory: Grundlagen qualitativer Sozialforschung*. Weinheim: Beltz PsychologieVerlagsUnion, 1996.
- [20] J. Strübing, *Grounded theory: Zur sozialtheoretischen und epistemologischen Fundierung eines pragmatistischen Forschungsstils*. Wiesbaden: Springer VS, 2014. [Online]. Verfügbar unter: <http://d-nb.info/1051876435/04>
- [21] A. Bogner, B. Littig und W. Menz, *Interviews mit Experten: Eine praxisorientierte Einführung*. Wiesbaden: Springer VS, 2014.
- [22] A. Strauss und J. Corbin, „Grounded Theory Methodology: An overview“ in *Handbook of qualitative research*, N. K. Denzin, Hg., Thousand Oaks, Calif.: Sage Publ, 1994, S. 273–285.
- [23] A. L. Strauss und J. M. Corbin, *Basics of qualitative research: Grounded theory procedures and techniques*. Newbury Park, Calif: Sage, 1990.
- [24] D. A. Gioia, K. G. Corley und A. L. Hamilton, „Seeking Qualitative Rigor in Inductive Research“, *Organizational Research Methods*, Jg. 16, Nr. 1, S. 15–31, 2013, doi: 10.1177/1094428112452151.
- [25] A. Bryant, Hg., *The SAGE handbook of grounded theory*. Los Angeles: Sage, 2007.
- [26] K. D. Locke, *Grounded theory in management research*. London: Sage Publ, 2001. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.loc.gov/catdir/enhancements/fy0734/2001266628-b.html>
- [27] Viessmann, „Planungsanleitung: VITOCAL 350-HT PRO“, Allendorf (Eder), 2017. <https://www.viessmann.de/de/gewerbe/waermepumpe/grosswaermepumpen/vitocal-350-ht-pro.html>. (Aufgerufen 15. Dezember 2021).
- [28] Institut Wohnen und Umwelt, *Deutsche Wohngebäudetypologie: Beispielhafte Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz von typischen Wohngebäuden ; erarbeitet im Rahmen der EU-Projekte TABULA - "Typology approach for building stock energy assessment", EPISCOPE - "Energy performance indicator tracking schemes for the continous optimisation of refurbishment processes in European housing stocks"*. Darmstadt: IWU, 2015. [Online]. Verfügbar unter: http://www.building-typology.eu/downloads/public/docs/brochure/DE_TABULA_TypologyBrochure_IWU.pdf
- [29] Viessmann, „Datenblatt: Vitodens 200-W“, Allendorf (Eder), 2021. <https://www.viessmann.de/de/wohngebaeude/gasheizung/gas-brennwertkessel/vitodens-200-w.html>. (Aufgerufen 13. Februar 2022).
- [30] Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas,Telekommunikation, Post und Eisenbahnen, *Energie: Umstellung von L-auf H-Gas*. <https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Vportal/Energie/UmstellungGas/start.html> (Aufgerufen 22. Januar 2022).
- [31] *DIN V 18599 Beiblatt 1*, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, 2010.
- [32] Umweltbundesamt, „CO₂-Emissionsfaktoren für fossile Brennstoffe“, Dessau-Roßlau, 2016. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1968/publikationen/co2-emissionsfaktoren_fur_fossile_brennstoffe_korrektur.pdf. (Aufgerufen 22. Januar 2022).
- [33] *Bundes-Klimaschutzgesetz (KSG)*, 2021. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.gesetze-im-internet.de/ksg/BJNR251310019.html>
- [34] Umweltbundesamt, *Strom- und Wärmeversorgung in Zahlen*. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/energieversorgung/strom-waermeversorgung-in-zahlen#Kraftwerke> (Aufgerufen 23. Januar 2022).
- [35] Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen und Bundeskartellamt, „Monitoringbericht 2020: Monitoringbericht gemäß § 63 Abs. 3 i. V. m. § 35 EnWG und § 48 Abs. 3 i. V. m. § 53 Abs. 3 GWB“, Bonn, 2021. https://www.bundeskartellamt.de/SharedDocs/Publikation/DE/Berichte/Energie-Monitoring-2020.pdf;jsessionid=17F29BE9E678A755A41766DEAB92C194.1_cid387?__blob=publicationFile&v=4. (Aufgerufen 22. Januar 2022).
- [36] *Gesetz über einen nationalen Zertifikatehandel für Brennstoffemissionen (Brennstoffemissionshandelsgesetz - BEHG)*, 2019. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.gesetze-im-internet.de/behg/BEHG.pdf>