



Tagungsband

**7. Regenerative Energietechnik
Konferenz in Nordhausen**

08. - 09. Februar 2024

RET.Con 2024
7. Regenerative Energietechnik Konferenz in Nordhausen

Herausgeber:
Institut für Regenerative Energietechnik
Prof. Dr.-Ing. Viktor Wesselak
Hochschule Nordhausen
Weinberghof 4, 99734 Nordhausen



© 2024 by Hochschule Nordhausen
Alle Rechte vorbehalten

ISBN 978-3-940820-23-5



Inhaltsverzeichnis

Eröffnungssession

Stefan Krause, Liesa Hübner, Peter Kaufmann Energieeffizientes Solargewächshaus für den energieautarken Fruchtanbau mittels regenerativ erzeugter Energieströme und intelligenter Verwertungs- technologie – SolGreen	5
--	---

Session Bioenergie

Martin Hayduk , Romy Sommer, Edward Antwi, Johannes Gulden Decentralized Biomethanol Production – Biogeniv	25
---	----

Session Energiesystemmodellierung 1

Ann-Kathrin Weidlich, Anne Schierenbeck Erneuerbare Energiesysteme in Industrie- und Gewerbegebieten: Technologien und Modellierungsansatz	31
--	----

Malte Fritz, Jonas Freißmann, Ilja Tuschy Auslegung und Einsatz von Großwärmepumpen in verschiedenen multivalenten Wärmeversorgungssystemen basierend auf MILP-Optimierung	40
--	----

Session Energiesystemmodellierung 2

Patrik Schönfeldt , Diana Maldonado, Maximilian Hillen Waste heat from mobile groups of people in energy system optimisation	63
---	----

Dominik Dörr, Justin Münch, Mario Adam Hochaufgelöste Langzeitprognose des deutschen Strom-Importpotenzials mithilfe von Methoden des Maschinellen Lernens	71
--	----

Abhay Bajaj, Amélie Oberdorfer, Christoph Schmidt Implementation and Evaluation of Demand-Side Management using SinkDSM Module in oemof	79
---	----

Session Nachhaltige Hochschule 1

Bettina Hollstein, Learning by Doing – Gelingende Bildung für nachhaltige Entwicklung mit problemorientierten und situierten Lehr-Lern-Arrangements	95
---	----

Session Nachhaltige Hochschule 2

- Oliver Stark, Michael Dölz, Johannes Kluck, Tobias Plessing 115
Konzeptentwicklung: Die treibhausgasneutrale Liegenschaft in öffentlicher Hand
am Beispiel der Hochschule Hof
- Marius Wohlfahrtstätter, Prof. Dr.-Ing. Mario Adam 129
VR4energy – Entwicklung einer Virtual Reality-Anwendung für Schülerlabore
zur Energiewende
- Rainer Stauch 136
CO2-Calculator HSE

Session Photovoltaik

- Maximilian Schönau, Darwin Daume, Markus Panhuysen, Achim Schulze, 145
Bernd Hüttl, Dieter Landes
Verbesserte Clear-Sky-Erkennung durch hybrides Maschinelles Lernen
- Stefan Gessert, Stefan Brunzel, Kerstin Wydra 153
Biodiversitäts-Guidelines auf wissenschaftlicher Basis für PV-
Freiflächenanlagen

Session MSR in der Energietechnik

- L. Jäger, S. Hart, R. Reguera, W. Grote-Ramm, M. Neef 155
Autonome Nachführungssteuerung eines Parabolrinnen-Teststands mittels
Microcontroller
- Klaus-Peter Neitzke, Heidi Schell 163
Ein modulares LoRa-Sensornetzwerk
für Forschungszwecke und industrielle Messdatenerfassung

Session Erfahrungsberichte

- Bruno Spessert 172
Anmerkungen zu Holz(pellet)-Heizungen

Session Energiekonzepte für Gebäude

- A. Salaymeh, T. Mehring, F. Kleff, I. Peters, E. Bertram, S. Föste, S. Holler 183
Temperaturkataster zur Analyse der Realisierbarkeit des NT-Ready-Standards
im Wohngebäudebestand
- Oliver Mercker, Modar Yasin, Christoph Büttner, Peter Simulationsstudie zu 192
Transformationsmaßnahmen zur hygienischen Absenkung der Trinkwarm-
wassertemperatur in Mehrfamilienhäusern mit Wärmepumpen in TRNSYS

Energieeffizientes Solargewächshaus für den energieautarken Fruchtanbau mittels regenerativ erzeugter Energieströme und intelligenter Verwertungstechnologie – SolGreen

Stefan Krause¹, Liesa Hübner¹, Peter Kaufmann¹

¹ Institut für Strukturleichtbau und Energieeffizienz gGmbH

Abstract

Terrestrische Ressourcenknappheit und globales Bevölkerungswachstum erfordern eine fortschrittliche, nachhaltige Nahrungsmittelproduktion unter Berücksichtigung der europaweiten Klimaziele. Der Anbau in Gewächshäusern spielt dabei eine bedeutende Rolle. Solare Energiegewinnung (PV, ST, PVT) auf Gewächshäusern ermöglicht gleichzeitig Energieerzeugung und Beleuchtungsoptimierung bzw. Verschattung. Unter Berücksichtigung steigender Energiekosten und der zum Gelingen der Energiewende nötigen Abkehr von der Nutzung fossiler Brennstoffe stellt das Projekt einen Beitrag im Rahmen der Ressourceneffizienz dar.

Ziel des Projektes SolGreen war die Entwicklung einer Technologie zur gleichzeitigen Wandlung der solaren Energie in elektrische und thermische Energie mittels eines teiltransparenten PVT-Kollektors einschließlich ihrer Nutzung für den Anwendungsfall in Gewächshäusern. Damit konnte ein energieeffizientes Solargewächshaus mit innovativer PVT-Technologie für den energieautarken Fruchtanbau mittels regenerativer Energieströme und intelligenter Verwertungstechnologien unter wirtschaftlichen Bedingungen für einen nahezu ganzjährigen Anbau entwickelt werden.

1. Einleitung

Die Ausgangssituation ist gekennzeichnet durch die steigenden Anforderungen zur Minderung der Treibhausgase über alle Bereiche mit dem Ziel der Einhaltung der Forderungen der Weltklimakonferenz von Paris (vgl. [1], [2], [3]) sowie die darauf aufbauenden nationalen und internationalen Gesetze und Abkommen. Dabei stellt die Logistik im Zusammenhang mit Lebensmitteltransporten einen wesentlichen Treibhausgasemittenten dar (vgl. [4] [5], [6]).

Wie aus Abbildung 1 deutlich wird, erzeugen international transportierte Früchte durch Transport mit Flugzeug und Produktion mehr als Faktor 20 CO₂ pro kg Gemüse und Früchte.

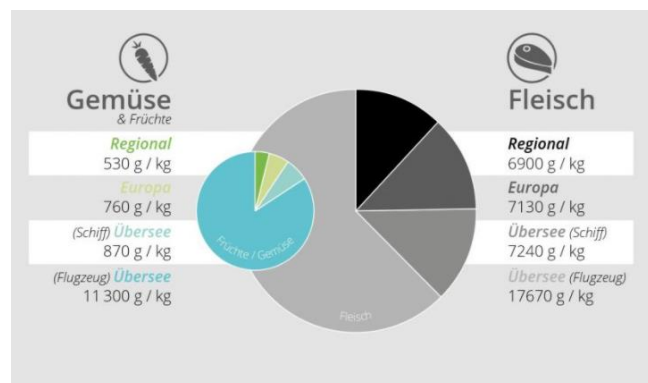


Abb. 1: Vergleich Treibhausgasemissionen von Gemüse im regionalen und internationalen Anbau [4]

Demnach ist die Verwendung von regionalem Gemüse und Früchten klimaschonender, wie es auch das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit [7] sowie weitere Quellen belegen (siehe dazu [8], [9], [10], [11]).

Dabei ist neben Freilandanbau von Obst und Gemüse der Einsatz von Gewächshäusern zur Deckung des ganzjährigen Bedarfs erforderlich [12], [13]. Die auf dem Markt verfügbaren Gewächshäuser zeichnen sich durch unterschiedliche Bauweisen (Folie vs. Glas) sowie Funktionalitäten (Heizbarkeit, Wärmerückgewinnung) aus. Für die ganzjährige Nutzung ist es dabei erforderlich, wie aus den o.g. Quellen hervorgeht, Heizungen einzusetzen. Dabei führt wie [14] darstellt, der Einsatz beheizter Gewächshäuser zu einem drastischen Anstieg der Treibhausgasbilanz, wodurch sich der ökologische Vorteil des regionalen Anbaus maßgeblich vermindert.

Die Gewächshauslösungen des Standes der Technik zeichnen sich demnach durch Lösungen aus, die das ganzjährige Betreiben des Gewächshauses nur unter erheblicher Verschlechterung der Gesamtenergieeffizienz und damit verbundener Treibhausgasemissionssteigerung ermöglichen (siehe dazu auch [15], [16], [17]).

Zur Steigerung der Energieeffizienz, um die Klimaschutzziele der EU sowie der BRD zu erreichen (siehe dazu [18], [19], [20], [21]), sind dabei sowohl Energieverbräuche zu senken als auch den Anteil Erneuerbarer Energien zu steigern. Die auf dem Markt verfügbaren Ansätze zur Umsetzung der Zielstellungen mittels Gewächshäuser setzen dabei auf PV-Lösungen in Kombination mit Wärmemanagementlösungen. Ganzheitliche Ansätze sind nicht bekannt.

Zur Erfüllung der Zielstellungen, den regionalen Anbau von Gemüse und Obst zu steigern und die damit verbundene steigende Anzahl beheizter Gewächshäuser mit den Anforderungen der Energieeffizienz durch den Einsatz regenerativer Energiequellen zu vereinen, wird im Rahmen des Vorhabens ein Gewächshaus entwickelt, welches unter Einbeziehung intelligenter Steuerungstechnologien verbunden mit einer schnellen Montagetechnologie einen energieautarken Betrieb ermöglicht.

Der Marktbedarf ergibt sich im Wesentlichen aus den Erfordernissen zur Steigerung der Energieeffizienz von Gewächshäusern zur Ermöglichung des ganzjährigen energieeffizienten regionalen Anbaus von Obst und Gemüse sowie weiteren Pflanzen, da die auf dem Markt verfügbaren Gewächshäuser keine Lösung zur Erzielung der Anforderungen darstellen. Eine Abschätzung der Marktgröße zeigen aktuelle Zahlen des statistischen Bundesamtes sowie des BMEL [22], wobei dort für das Jahr 2019 ca. 1.280 ha Anbauflächen in Gewächshäusern für Deutschland allein für Gemüse angegeben werden. Zusätzliche Flächen ergeben sich aus dem Obstanbau (v.a. Beerenobst) sowie Zier- und Nutzpflanzen.

Je nach Anbaukultur, regionalen Wetterbedingungen, Finanzrahmen und dem geforderten Klimamanagement werden verschiedene Gewächshaustypen eingesetzt, vgl. Tabelle 1.

Tab. 1: Gewächstypen und ihre Eigenschaften [23]

Offene Systeme	Geschlossene Systeme
<ul style="list-style-type: none">▪ Nutzen natürlicher Ventilation▪ Kostengünstig▪ Stark abhängig von Wind▪ Wetterabhängig - erhöhter Bedarf an Luftentfeuchtung und Temperaturkontrolle	<ul style="list-style-type: none">▪ Rein mechanische Ventilation▪ Großer Grad an Kontrolle über Ventilation, Temperatur und Temperaturgradient▪ Höhere CO₂-Konzentration möglich▪ Geringerer Pestizidbedarf▪ Höhere Investitionskosten▪ Höhere Operationskosten▪ Signifikant höherer Ernteertrag

Typischerweise besteht ein Gewächshaus aus:

- Strukturgerüst
- Deckmaterial
- Beeten bzw. Pflanztischen
- Sonnenblenden bzw. Energieschirmen
- Heiz- und Kühlsystemen
- Ggf. CO₂-Anreicherung
- Bewässerungs- und Düngesystemen
- Luftbe- und -entfeuchtungssystemen
- Kontrollsystemen

Als Deckmaterialien, bei denen UV-Stabilität eine Grundvoraussetzung für die Eignung ist, kommen Glas oder Hartplastik (PMMA, PC, PVC) zum Einsatz für Gewächshäuser mit starrer Verkleidung. Glas bietet eine hohe Beständigkeit gegenüber Umwelteinflüssen und Chemikalien, eine hohe Lichtdurchlässigkeit für sichtbares Licht, eine hohe Infrarotabsorption und eine hohe Lebensdauer. Dagegen ist Hartplastik kostengünstiger und bietet eine höhere Wärmedämmwirkung, allerdings zeigt es auch eine geringere Lichtdurchlässigkeit. Doppel- oder Dreifachverglasung werden selten eingesetzt, da der Verlust an Lichttransmission die Energieeinsparung durch Wärmedämmung überwiegt [23]. Schattierungselemente, Energieschirme, Heizung, Kühlsysteme, Bewässerungs- und Düngesysteme etc. werden nach den Wünschen der Auftraggeber in manueller oder automatischer Ausführung installiert. Bei der Errichtung eines Gewächshauses sind die größten Anteile an den Investitionskosten die Kosten für das Gewächshaus selbst sowie für die Heizung [24]. Demnach bietet sich hier ein besonderes Innovationspotenzial im Hinblick auf kostengünstigere und energieeffizientere Gewächshäuser.

Aktuell bestehen folgende Defizite:

- Konventionelle Gewächshäuser werden mittels fossiler Brennstoffe beheizt (bei aktueller Preisentwicklung sehr teuer; steht im Widerspruch zu den Energiezielen)
- Bisher unzureichender Einsatz regenerativer Energien und Energiemanagementsysteme
 - Bisher nur PV und bei unzureichendem Einsatz
 - Erfordernis: Senkung des Energiebedarfs, Einsatz Erneuerbarer Energien, Speicherung von solaren Energieüberschüssen saisonal und im Tag/Nacht-Zyklus
 - Einsatz niederkalorischer Systeme zur besseren Ermöglichung des Einsatzes Erneuerbarer Energien

Mit dem hier vorgestellten Forschungs- und Entwicklungsprojekt wird die Grundlage für den nahezu energieautarken Gewächshausanbau unter wirtschaftlichen Bedingungen geschaffen sowie zukunftsweisende Systeme für einen nahezu ganzjährigen Anbau entwickelt.

2. Zielstellungen und Konzeptentwicklung

Die technologische Zielstellung des FuE-Projektes besteht in der Entwicklung eines energieeffizienten Solargewächshauses für Landwirte mit dem Ziel des energieautarken Fruchtanbaus mittels regenerativ erzeugter Energieströme und intelligenter Verwertungstechnologie.

Die angestrebten Funktionalitäten des zu entwickelnden Gewächshauses zeigt zusammengefasst Abbildung 2.

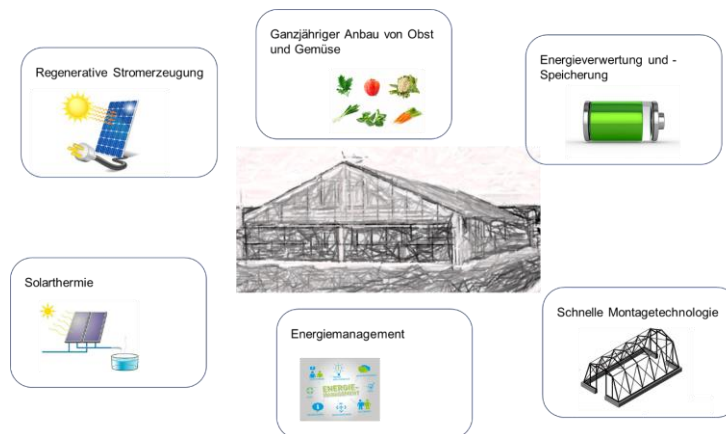


Abb. 2: Schematische Darstellung Entwicklungsziele

Das entwickelte SolGreen-Gewächshaus zeichnet sich demnach aus durch

- regenerative Erzeugung thermischer und elektrischer Energie aus solarer Einstrahlung
- Einbindung der Energieströme in ein Energiemanagementsystem in Verbindung mit anforderungsgerechten Speicher- und Verwertungstechnologien
- schnell montierbare Stahlkonstruktion

mit dem Ziel des energieeffizienten ganzjährigen Anbaus von Obst und Gemüse mit minimalen CO₂-Footprint zu ermöglichen.

3. Erprobung und Technologieevaluierung

Ein wesentlicher Bestandteil in der Entwicklung des energieeffizienten Solargewächshauses bildet die PVT-Technologie zur regenerativen Energiegewinnung bei gleichzeitiger Verschattungsfunktion und hinreichender Lichttransparenz zur Gewährleistung optimaler Anbaubedingungen für einen möglichst breiten Bereich an Pflanzenkulturen.

Für die Entwicklung der Kollektoren wurde eine Anforderungsanalyse erstellt, die sowohl technologische als auch anwendungsspezifische Anforderungen berücksichtigt. Im Ergebnis der Anforderungsanalyse und dem daraus abzuleitenden Pflichtenheft wurden erste Lösungsansätze für PVT-Kollektoren entwickelt (s. Abbildung 3 und 4). Diese stellen eine Kombination aus PV-Modulen und Solarthermie-Kollektoren dar.



Abb. 3: Prinzipielle Aufbauvarianten: links WÜ vollflächig auf gesamtem PV-Modul und rechts WÜ partiell (nur unter Wavern)

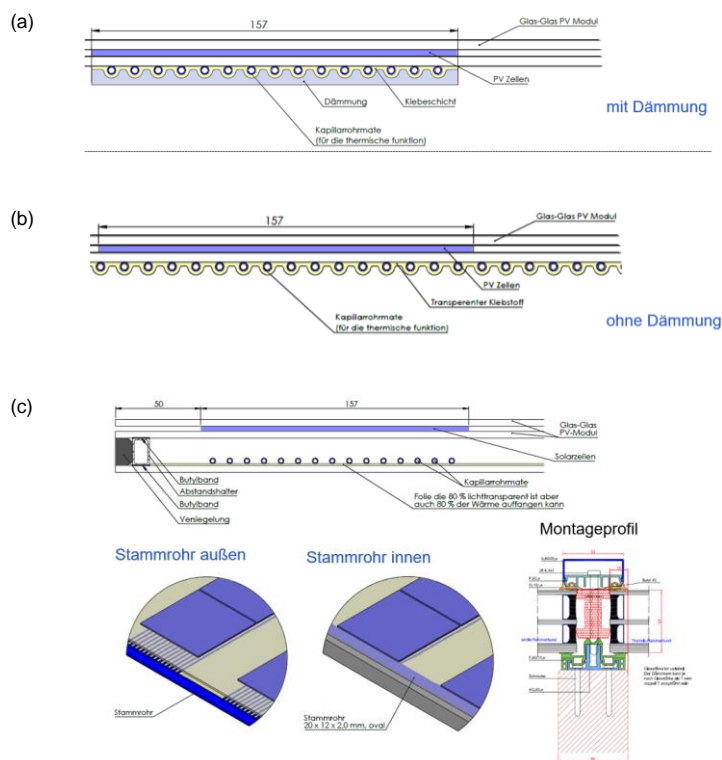


Abb. 4: Konstruktionsvarianten mit Kapillarrohrmatte: (a) direkt mit Dämmung, (b) direkt ohne Dämmung und (c) mit Luftspalt und zwei Möglichkeiten zur Stammrohrführung sowie mögliches Montageprofil

3.1 Labortechnische Voruntersuchung der PVT-Fertigung

Zur Herstellung der PVT-Module labortechnische Voruntersuchungen zur Erprobung verschiedener Fügetechnologien durchgeführt. Die Anforderungen an diese Fügetechnologie lagen in einer hohen Wärmeleitfähigkeit bei maximaler Transparenz, wobei die durchgeführten Recherchen zeigen, dass glasklare Systeme immer wesentlich kostenintensiver sind als ihre opaken Pendanten. Im Rahmen des Projektes wurden verschiedene transparente Klebe- und Dichtungsmaterialien untersucht. Außerdem wurden die Möglichkeiten von lösbaren Verbindungen, wie Klemmen und Laminieren sowie formschlüssigen Verbindungen betrachtet, bei denen der flächige Wärmeübertrager über Klemmleisten mit dem PV-Modul verbunden ist. Zur Verbesserung des Wärmeübergangs wurden Al-Profil-Schienen zur Optimierung des Wärmeübergangs im Spalt zwischen PV-Modul und Wärmeübertrager verwendet.

Bereits in den Vorversuchen zeigte sich, dass nicht lösbare Verbindungen eine höhere Verbundfestigkeit aufweisen. Für die Entwicklung der Klebetechnologien wurden entsprechend eines erarbeiteten Pflichtenhefts Voruntersuchungen (Haft-Zug-Untersuchen, Temperaturbelastungen, Temperaturwechselbelastungen, etc.) mit verschiedenen Klebstoffen sowie den dazugehörigen Vor- und Nachbehandlungen durchgeführt.

Um das Konzept des Verbindens von PV- und WÜ-Elementen weiterzuentwickeln, wurden zunächst Klebeversuche mit verschiedenen Arten von Klebern durchgeführt. Hierbei wurde transparente PP-Kapillarrohrmatten auf eine Glasscheibe geklebt. Bei einigen Kapillarrohren wurde nur die Unterseite verklebt, während andere vollständig eingebettet wurden, wie in Abbildung 5 dargestellt. Vor dem Auftragen der Kleber wurden die Oberflächen mit handelsüblichem Glasreiniger entfettet.

Einkomponenten-Kleber wurden manuell aus der Verpackung aufgetragen, Zweikomponenten-Kleber entsprechend der Gebrauchsanweisung angemischt und aufgebracht.

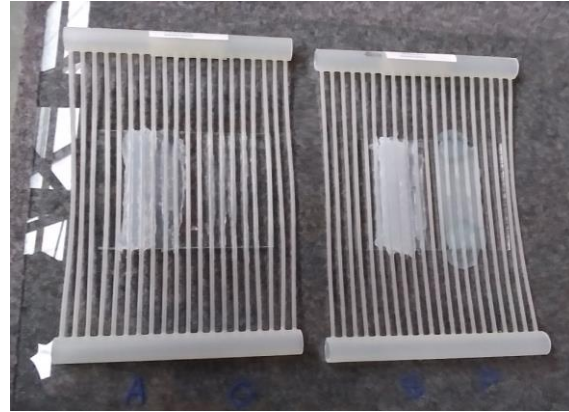


Abb. 5: Klebeversuche PP auf Glas zur Entwicklung der Füge-technologie PV-WÜ

Tabelle zeigt die Ergebnisse der Versuche. Demnach zeigen vier Varianten eine gute Anbindung der Kapillarrohrmatte am Glas, insbesondere bei Volleinbettung. Die Transparenz ist erwartungsgemäß umso höher, je dünner die Klebschicht ist, jedoch sind drei der untersuchten Transparenzkleber nur bei extrem dünnen Schichten optisch vollständig transparent.

Allerdings stellte sich bereits nach wenigen Wochen eine deutliche Verfärbung der Röhrchen ein, die Klebeverbindungen begannen sich aufgrund der Schälbelastung im montierten Zustand der Testobjekte abzulösen. Nach Rücksprache mit dem Hersteller Clina wurde empfohlen, stattdessen eine nicht-transparenten Variante der Kapillarrohrmatten einzusetzen, um Alterungserscheinungen vorzubeugen.

Tabelle 2: Versuchsergebnisse - Kleben

Aquarium Silikon transparent	Pattex ONE FOR ALL CRYSTAL	Silikon transparent	Ponal Holzleim wasserfest
			
Viskos → leichte Applikation	Hochviskos → schwierige Applikation (hoher Kraftaufwand)	Viskos → leichte Applikation	Niederviskos → schwierige Applikation (läuft weg)
Hohe Transparenz nur bei dünner Schicht	Hohe Transparenz	Hohe Transparenz nur bei dünner Schicht	Hohe Transparenz nur bei sehr dünner Schicht

Mit dem 2-Komponenten-Klebersystem Elastocoat konnten gute Ergebnisse erreicht werden. Allerdings kam es nach einige Wochen realistischer Einwirkungen von UV-Einstrahlung, Temperaturgradienten, Feuchteintrag zum Ablösen der Matten mit Elastocoat-Verguss ohne vorherigen Auftrag von Haftvermittlern (Primer) von den PV-Modulen.

Aufgrund dieser Ergebnisse wurde die finale Klebstoffkonstellation, basierend auf einer 2K-Polyurethan-Vergussmasse, Elastocoat C95, die eine gute UV-Beständigkeit, sowie eine hohe Wärmeleitfähigkeit vom Modul zum Kapillarrohr aufweist, entwickelt. Eine Herausforderung bei der Verwendung dieses Klebstoffes bestand in den Hafteigenschaften der Vergussmasse auf Glas, da sich in einigen Vorversuchen, wie bereits bei den zuvor betrachteten Klebevarianten, bereits nach einigen Tagen im montierten Zustand aufgrund der Schälbelastung vom Test-Modul eine Ablösung der Matten einstellte. Abhilfe schaffte das vorherige Aufbringen eines Haftvermittlers (Sika Primer 207). Die Testmodule wurden unterhalb der Einzelzellen des PV-Modul mit Primer eingestrichen und die Kapillarrohrmatten präzise auf den Modulen in Position gebracht. Die mit Haftvermittler eingestrichenen Flächen wurden mit einer Kontur aus Gummi-Dichtband umgeben, sodass eine Gussform für den Kleber unterhalb jeder Einzelzelle des PV-Moduls entstand. Diese Form wurde anschließend mit der 2K-Polyurethan-Vergussmasse ausgefüllt und die Kapillarrohre umschlossen. Es konnte eine langzeitstabile, elastische und witterungsbeständige Fügevariante mit einer besonders guten Wärmeleitfähigkeit und geringer Verschattung, da die Kapillarrohrmatten ausschließlich hinter den Einzel-PV-Zellen vergossen wurden, entwickelt werden.

3.2 Demonstratoruntersuchungen - Freifeld-Solarlabor

Für die wissenschaftliche Erprobung der Funktionsfähigkeit und Leistungsparameter der entwickelten PVT-Modullösungen wurde ein spezieller Versuchsstand auf dem Freifeld-Solarlabor des ISE entwickelt. Dieser besteht aus einer Item-Profil-Konstruktion, welche Platz für die gleichzeitige Erprobung von bis zu 6 PVT-Modulen bietet (s. Abbildung 6 und 7). Für die Abbildung einer vergleichbaren Gewächshausatmosphäre wurde die Tragkonstruktion mit transparenten PC-Stegeplatten verkleidet. Die Aufbauhöhe von ca. 1,5 m wurde als Kompromiss zwischen einer guten Zugänglichkeit für Installations- und Wartungsarbeiten sowie einer hinreichenden Stabilität gegenüber Windlasten gewählt. Die PVT-Module sind über speziell entwickelte Profillösungen mit dem Tragskelett des Versuchsstandes verbunden. Der Versuchsstand ermöglicht die Erfassung der Umgebungsbedingungen (Globalstrahlung, Außentemperatur, Windgeschwindigkeiten) sowie der elektrischen und thermischen Leistungsparameter der PVT-Module. Über einen individuell steuerbaren Kühlkreislauf lässt sich der Einfluss unterschiedlicher Betriebsparameter (Volumenstrom, Vorlauftemperatur) auf die thermische Leistung des PVT-Moduls in Abhängigkeit von verschiedenen Umgebungsbedingungen bestimmen.



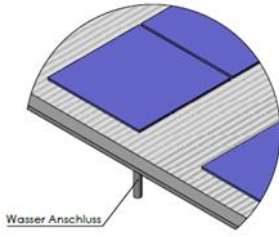
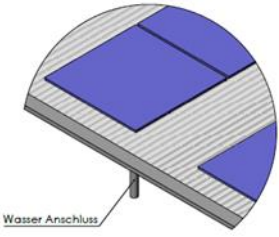
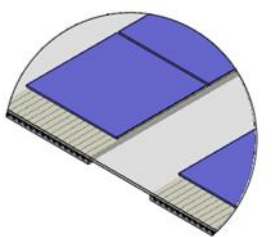
Abb. 6: Versuchsstand zur Erprobung der PVT-Kollektoren: (a) Konstruktionsentwurf und (b) Tragskelett



Abb. 7: Versuchsstand zur Erprobung der PVT-Kollektoren

Für die im Rahmen der Laborversuche untersuchten PVT-Module wurden zwei unterschiedliche Glas-Glas-PV-Module des Herstellers Wismar Solar verwendet. Der Modultyp M48 besteht aus 48 monokristallinen Solarzellen und hat eine elektrische Spitzenleistung von $240 W_p$ bei einer Transparenz von ca. 27 %. Der Modultyp M32 besteht aus 32 monokristallinen Solarzellen und hat eine elektrische Spitzenleistung von $170 W_p$ bei einer Transparenz von ca. 50 %.

Tab. 3: PVT-Modulkonzepte mit unterschiedlichen Wärmeübertragungssystemen

	V1 – LaWin-Glas	V2 – PC-Steplatte	V3 – Kapillarrohrmatte
Bild			
Verbindung	Klemmverbindung mit Aluleisten zur Wärmeübertragung	Klemmverbindung mit Aluprofilen	Klebeverbindung mit Pattex ONE FOR ALL CRYSTAL
WÜ-Fläche	vollflächig	vollflächig	partiell
Kontaktfläche	vollflächig	vollflächig	linear

Für die thermische Energiewandlung an der Rückseite der Glas-Glas-PV-Module-Wärmeübertrager wurden die in Tabelle 3 dargestellten Wärmeübertragerkonzepte untersucht. Am geeignetsten erwiesen sich hier die rückwärtige Anbringung von UV-beständige Kapillarrohrmatten aus Polypropylen. Für eine optimale Wärmeübertragung zwischen den PV-Modulen und den Kapillarrohrmatten wurde die umwelt- und UV-stabile 2K-Vergussmasse (Elastocoat C95 – Vosschemie) verwendet. Um eine gute Haftung der Vergussmasse auf den PV-Modulen zu gewährleisten, wurde diese zuvor mit einer Primer-Grundierung (Sika 207) versehen. Das Aufbringen sowohl des Primers als auch der Vergussmasse erfolgte nur unter den Solarzellen (s. Abbildung 8).

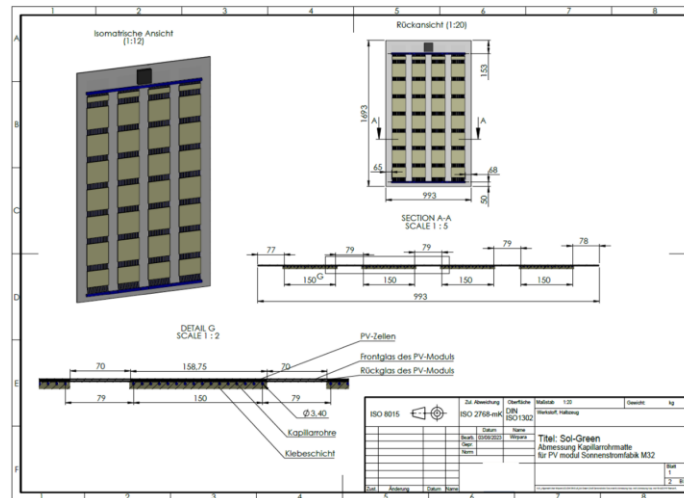


Abb. 8: Versuchsstand zur Erprobung der PVT-Kollektoren

Nach dem Trocknen des Haftvermittlers wurden auf den Rückseiten der PV-Module Guss-Formen oberhalb der Einzelzellen aufgebracht. Hierfür wurden Gummi-Dichtbänder und Clina Omega-Bänder verwendet, um Einzelformen zu erstellen (s. Abbildung 9).

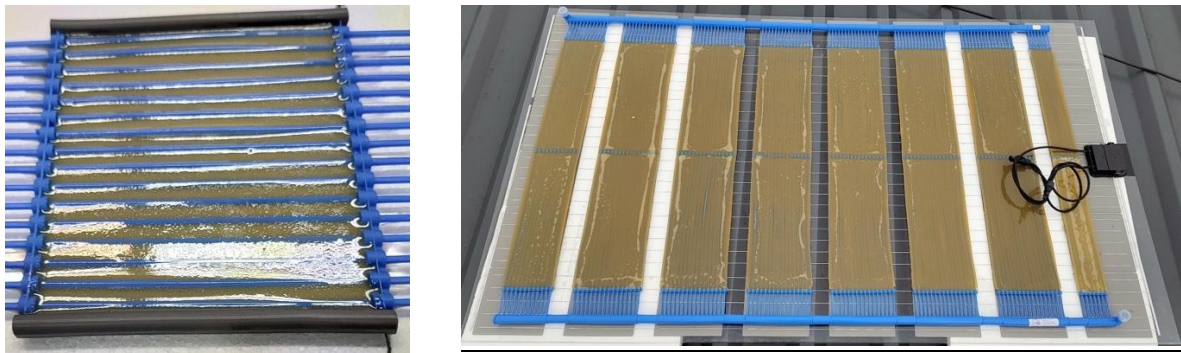


Abb. 9: Aufnahmen aus der Fertigung der PVT-Module, links: ausgegossene Einzelform M32-PVT-Modul, rechts: streifenförmig vergossenes M48-PVT-Modul

Nach dem Ausgießen der Einzelformen mit Elastocoat wurden die Kapillare der Matte in der noch flüssigen Vergussmasse heruntergedrückt, um einen guten Kontakt mit dem PV-Modul während des Aushärteprozesses zu gewährleisten (s. Abbildung 10).



Abb. 10: Aufnahmen aus der Fertigung der M48-PVT-Module

Für die Evaluierung der elektrischen Leistungsfähigkeit der PVT-Module wurden Untersuchungen mit verschiedenen PV-Modultypen (M48, M32), bei verschiedenen Himmelsausrichtungen (West-Ost-Ausrichtung), einem repräsentativen Dachneigungswinkel (15°) bei unterschiedlichen technischen Betriebsparametern (Volumenstrom, Vorlauftemperatur) und variierenden Umgebungsbedingungen (Globalstrahlung, Außentemperatur, Windgeschwindigkeit) durchgeführt. Die nachstehende Abbildung zeigt auszugsweise ein Messergebnis aus der Erprobung eines M48-PVT-Moduls.

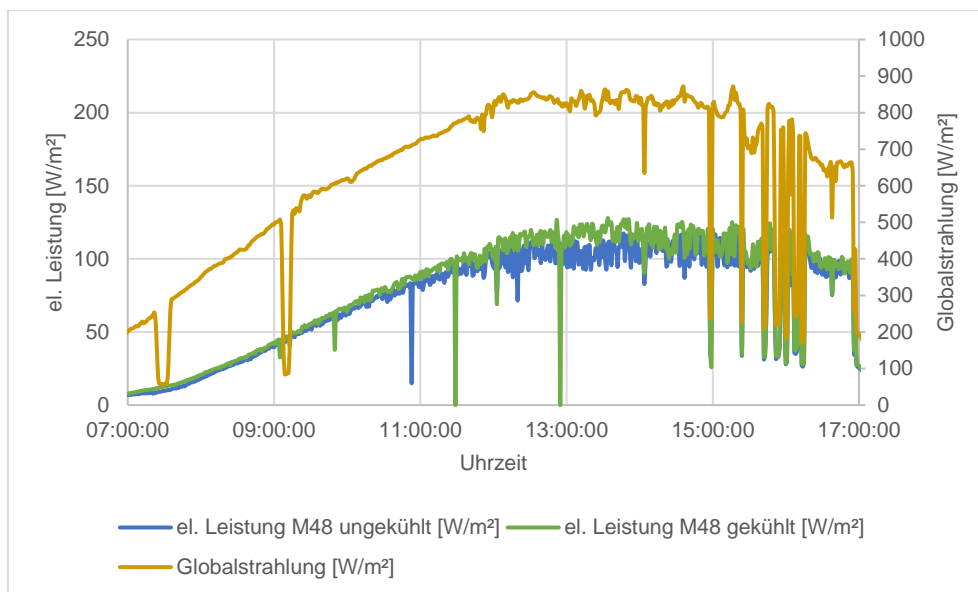


Abb. 11: Nachweis elektrischer Energie

Die Untersuchungsergebnisse belegen, dass die Kühlung der PV-Module einen Leistungsabfall, infolge der Modulerwärmung verhindert. Die Leistung von PV-Module wird nach STC-Testbedingungen standardmäßig bei Umgebungstemperaturen von 25 °C bestimmt. Für höhere Temperaturen ergeben sich je nach Modultyp Leistungsverluste von ca. 0,3 – 0,4 % Verlust an Leistung pro Kelvin. Diesen Leistungsabfällen kann durch eine wirkungsvolle Kühlung der Module durch Kapillarrohrmatten entgegengewirkt werden.

Die in Abbildung 11 dargestellten Messergebnisse resultieren aus den nachfolgenden Versuchsbedingungen:

- Vorlauftemperatur ca. 15°C

- Durchfluss: ca. 1,8 Liter/min. → 108 Liter/h → 80 Liter/h m²
- Himmelsrichtung: West; Dachneigungswinkel 15°
- M48 ist die Bezeichnung des Moduls, welches eine Lichtdurchlässigkeit von 27 % aufweist

Die gelbe Kurve im Diagramm zeigt die Globalstrahlung, die im Tagesverlauf zunimmt (max. Wert ca. 850 W/m²). Die grüne Kurve stellt das gekühlte Modul M 48 dar, die blaue Kurve das ungekühlte Modul M48. Mit steigender Globalstrahlung nimmt auch die elektrische Leistung der Module (blaue und grüne Kurve) zu, außerdem ist erkennbar, dass die grüne Kurve des gekühlten Moduls mehr elektrische Leistung erbringt als die blaue Kurve des ungekühlten Modells.

Für die Untersuchung der thermischen Leistungsfähigkeit der entwickelten PVT-Module wurden Versuche bei unterschiedlichen technischen Betriebsparametern (Volumenstrom, Vorlauftemperatur) und variierenden Umgebungsbedingungen (Globalstrahlung, Außentemperatur, Windgeschwindigkeit) durchgeführt. Die nachstehende Abbildung zeigt auszugsweise ein Messergebnis aus der Erprobung eines M48-PVT-Moduls mit unterschiedlichen technischen Parametern.

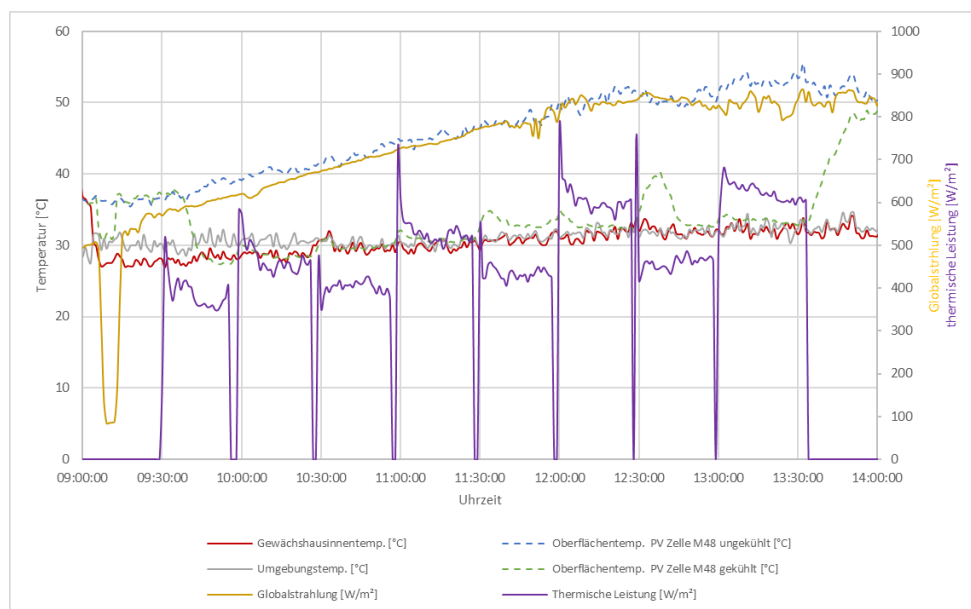
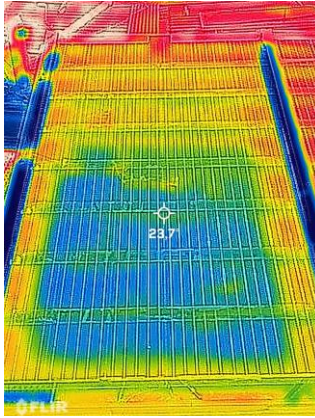


Abb. 12: Nachweis thermischer Energie

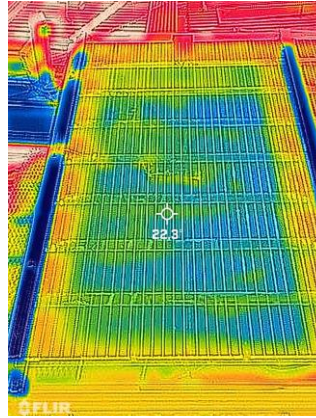
Die Untersuchungsergebnisse zeigen das thermische Spitzenleistungen zwischen ca. 400 – 650 W/m² ermittelt werden konnten. Das dargestellte Diagramm die unter den Umgebungsbedingung (Globalstrahlung, Umgebungstemperatur, Gewächshausinnentemperatur) ermittelten Oberflächentemperaturen sowie thermischen Leistungen. Im Vergleich der Oberflächentemperaturen lässt sich feststellen das deren Verlauf ohne rückseitige Kühlung (blau gestrichelte Kurve) dem Verlauf der Globalstrahlung (d.h. ansteigend) folgt. Durch die aktive Kühlung können die Oberflächentemperaturen der PV-Module (grün gestrichelte Kurve) signifikant reduziert werden, wodurch einerseits elektrische Leistungsabfälle der PV-Module reduziert und zum anderen thermische Leistungen für die angestrebte Verwertung als Strahlungsheizung gewonnen werden können.

Die in Abbildung 12 messtechnisch nachgewiesene Änderung der Oberflächentemperaturen konnte auch durch thermographische Messungen mit einer Wärmebildkamera dokumentiert werden. Wie in Abbildung 13 dargestellt, zeigt sich eine bessere Temperaturverteilung der PV-Module bzw. eine gleichmäßigere Kühlung bei der Kaltwasserzufuhr von unten nach oben.

Richtung der Kaltwasserzufuhr von oben nach unten (15° Modulneigung)



Richtung der Kaltwasserzufuhr von unten nach oben (15° Modulneigung)



Ungekühltes PV-Modul für die Referenz (15° Modulneigung)

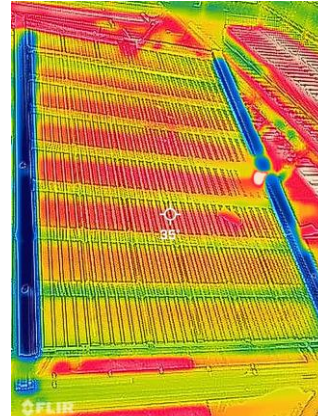


Abb. 13: Aufnahmen aus der Vermessung der PVT-Module mittels Wärmebildkamera bei aktiver Kühlung (linkes, mittleres Bild) bzw. ohne aktive Kühlung (rechtes Bild)

Das rechte Bild zeigt ein vergleichbares Modul ohne aktive Kühlung. Insbesondere im Bereich der schwarzen Wafer ist eine deutliche Erhöhung der Temperatur auf der Oberfläche zu erkennen, hier ca. 35 °C bei einer Umgebungstemperatur von ca. 30 °C.

Neben dem Einfluss unterschiedlicher Vorlauftemperaturen wurden auch die thermischen Leistungen im Vergleich unterschiedlicher Modultypen (M48, M32) untersucht. Die Abhängigkeit der Wärmeleistung von der Vorlauftemperatur (VLT) bei konstantem Volumenstrom ist in Abbildung 14 dargestellt. Bei diesem Versuch wurde der Einfluss unterschiedlicher Vorlauftemperaturen (8 – 24 °C) in Abhängigkeit vom Modultyp in verschiedenen Zeitintervallen (15 Minuten) untersucht. Die Messungen zeigen, dass bei gleichem Volumenstrom und gleicher Vorlauftemperatur für die M48-Module signifikant höhere Rücklauftemperaturen und damit auch höhere thermische Leistungen ermittelt werden konnten.

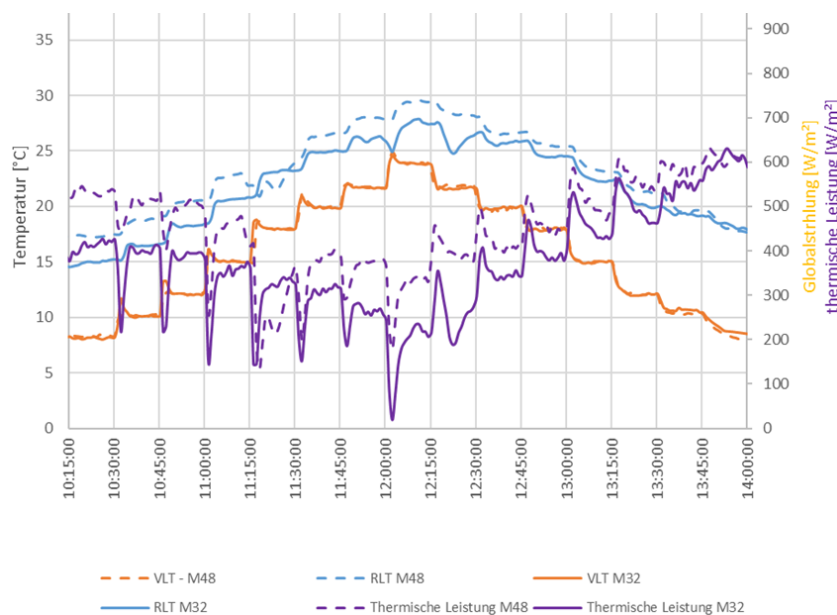


Abb. 14: Vergleich der Module M48 und M32

Im Rahmen der durchgeführten Messungen konnte ein linearer Zusammenhang zwischen dem Anstieg der Vorlauftemperatur und der Abnahme der Wärmeleistung nachgewiesen werden. Mit zunehmender Durchflussmenge in den Kapillarrohrmatten steigt die aufnehmbare Wärmemenge logarithmisch an. Das resultiert aus der Tatsache, dass bei höherem Durchfluss die Temperaturdifferenz zwischen Vorlauftemperatur und Wafer-Temperatur maximal ist, was den Antrieb für den Wärmeübergang optimiert. Die labortechnischen Voruntersuchungen belegten damit die prinzipielle Umsetzbarkeit von PVT-Modulen für die Entwicklung eines energieeffizienten Solargewächshauses.

3.3 Großdemonstrator - Monitoring

Aufbauend auf den entwickelten Gesamtkonzepten und Teilkonzepten für ein energieeffizientes Solargewächshaus, sowie den Erkenntnissen der Technologievalidierung im Labormaßstab wurde ein Großdemonstrator-Gewächshaus entwickelt. Ziel dieses Gewächshauses war der fertigungstechnische Nachweis der Realisierbarkeit eines energieeffizienten Solargewächshauses sowie die wissenschaftliche Erprobung und Evaluierung der entwickelten Produkt- und Verfahrenstechnologien. Die nachstehende Abbildung 15 zeigt eine 3D-Darstellung des entwickelten Solargewächshauses sowie die dazugehörige Stahlbau- und Fundamentplanung.

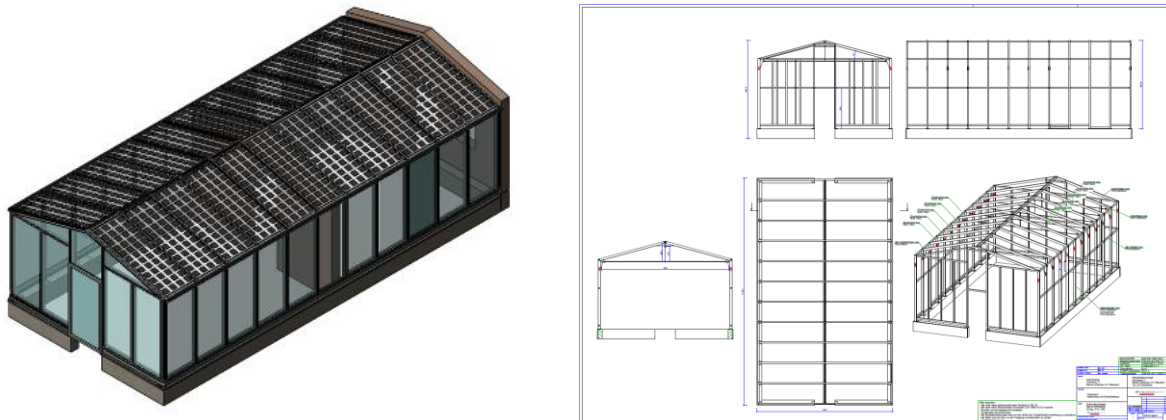


Abb. 15: Großdemonstrator-Gewächshaus, links: 3D-Model, rechts: Stahlbau- und Fundamentplanung

Das Großdemonstrator-Gewächshaus hat eine Grundfläche von ca. 11 m x 6 m und eine Firsthöhe von ca. 4 m. Es unterteilt sich in einen Monitoring-Bereich für die wissenschaftliche Erprobung von verschiedenen Pflanzenkulturen unter definiert einstellbaren Anbaubedingungen, sowie einen Technikbereich für die Unterbringung der technischen Ausstattung (z.B. Schaltschrank mit Energiemanagementsystem, Wechselrichter, Batteriespeicher, etc.). Das Gewächshaus wurde so ausgerichtet, dass die Dachfläche eine PV-Anlage mit Ost-West-Ausrichtung abbildet. Die Auslegung der Stahltragkonstruktion erfolgte unter Berücksichtigung der standortspezifischen Lastannahmen aus Eigenlast sowie den Standort Lichtenau (Chemnitz) anzusetzenden Wind und Schneelasten. Die Außenhülle des Gewächshauses besteht aus einer Doppelverglasung, für die Ermöglichung einer energieeffizienten Gebäudebilanz, d.h. die Senkung des Energieverbrauches und die Nutzbarkeit von regenerativen Energien. Für die Erprobung der entwickelten PVT-Technologie wurden zwei Modultypen des Herstellers Wismar Solar M48 und M32 mit Transparenzgraden von 20 % und 50 %. Insgesamt wurden 40 PVT-Module auf der Dachfläche des Großdemonstrator-Gewächshauses installiert. Die nachstehende Abbildung 16 zeigt den Medien- und Verlegeplan für die elektrische Installation und die Medienführung für den Thermiekreislauf.

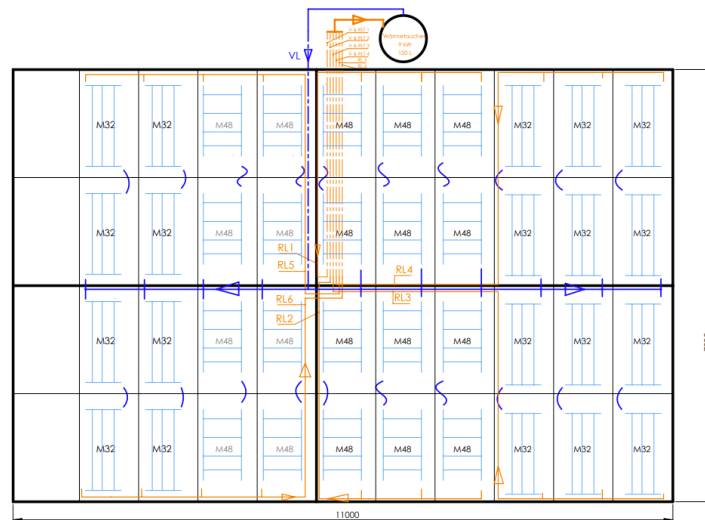


Abb. 16: Medien- und Verlegeplan für die installierten PVT-Module

Wie in Abbildung 16 dargestellt, kann somit im Monitoring-Bereich des Gewächshauses der Einfluss unterschiedlicher Einstrahlungen infolge der Himmelsausrichtung (Ost-West) sowie unterschiedlicher Transparenzgrade der PVT-Module (20 %, 50 %) für verschiedene Pflanzenkulturen evaluiert werden. Der Anbau der zu untersuchenden Pflanzenkulturen erfolgte in insgesamt 4 Hochbeeten (s. Abbildung 17 rechts). Im Rahmen des Projektes wurde der Anbau von Tomaten, Salaten und Erdbeeren als ausgewählte repräsentative Pflanzenkulturen untersucht. Abbildung 17 zeigt in der linken Abbildung die im Rahmen des Vorhabens entwickelten Heiztechnologiekonzepte. Davon wurden im Großdemonstrator-Gewächshaus die Varianten V1 in der Erde eingelassene Strahlungsheizung und V2 pflanzennahe oberflächige Strahlungsheizung realisiert.

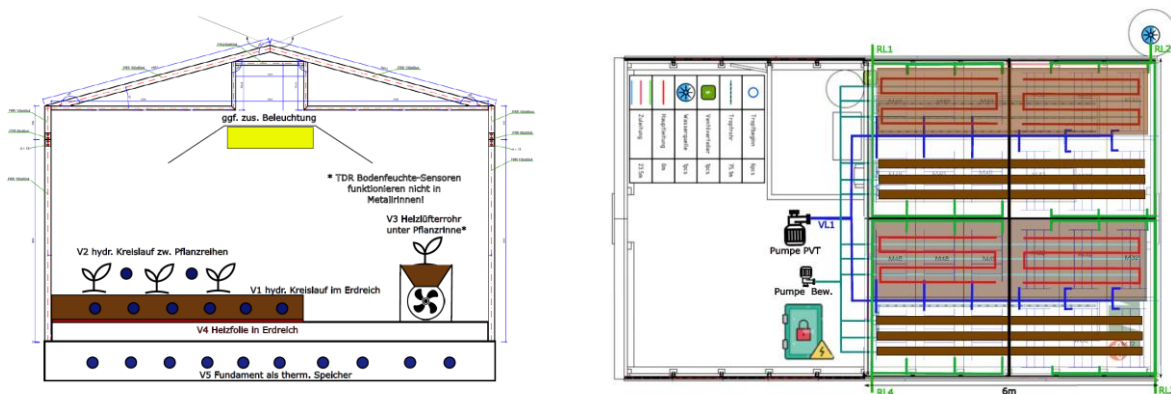


Abb. 17: Anbau- und Heizungskonzepte, links: entwickelten Heiztechnologiekonzepte, rechts: umgesetzte TGA-Lösung

Für den energieeffizienten Betrieb des Großdemonstrator-Gewächshauses und dessen Erprobung wurde ein Energiemanagementsystem entwickelt. Dieses ermöglicht die Messung, Steuerung und Regelung der Energieströme im Gewächshaus auf Basis eines Steuerungsmoduls und entsprechender Sensorik und Aktorik. Abbildung 18 zeigt den dem Energiemanagementsystem zugrunde liegende R&I-Schaltplan. Das Energiemanagementsystem ermöglicht die anwendungsspezifische Steuerung und Bilanzierung der PVT-Technologie durch die Erfassung der elektrischen und thermischen

Leistungsdaten sowie deren Verwertung in Form von direkter Nutzung in der Beet-Heizung oder deren Speicherung in unterschiedlichen Speichermöglichkeiten, wie etwa elektrischen Energiespeichern oder thermischen Speichern (Kurzzeit-Warmwasserspeicher, Langzeit- LKies-Wasserspeicher). Gleichzeitig ermöglicht das Energiemanagementsystem die Detektierung der Anbaubedingungen (Temperaturen, Helligkeit, Luftfeuchte, Bodentemperatur, Bodenfeuchte, etc.) sowie deren aktive Anpassung durch entsprechende Programmierung der Steuerung der Gewächshausfunktionen Bewässerung, Verschattung, Heizung/Kühlung, Lüftung, Energieverwertung und -speicherung.

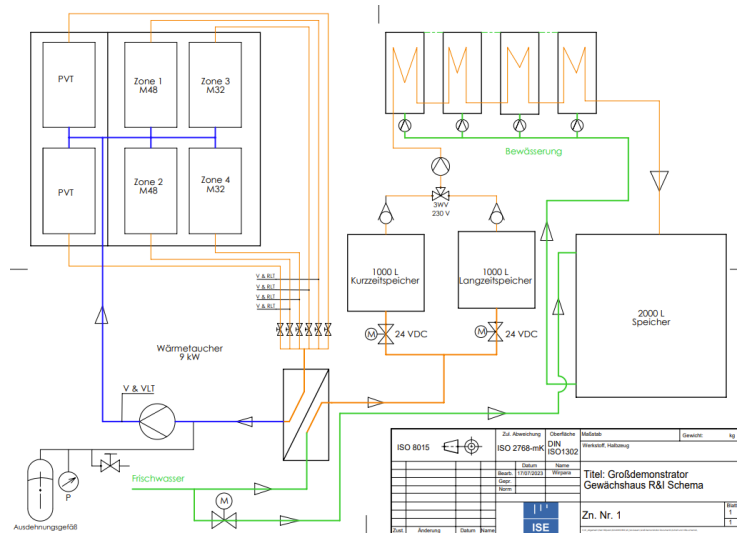


Abb. 18: R&I-Schema des Großdemonstrator-Gewächshauses

Aufbauend auf der erarbeiteten Konzeptplanung erfolgte die fertigungstechnische Umsetzung des Großdemonstrator-Gewächshauses beim Projektpartner SDC in Lichtenau bei Chemnitz. Die nachfolgende Abbildung 19 zeigt Aufnahmen aus dem Fertigungsprozess des Gewächshauses in modularer Systembauweise. Auf einem Streifenfundament mit Bodenplatte errichtet, verfügt das Gewächshaus über Kontaktplatten, die für Frostfreiheit sorgen. Die im Erdreich eingelassenen Speicher befindet sich in einer Tiefe von ca. 1,5 m und haben eine Speichervolumen von ca. 1000 Litern. Das Gewächshaus wurde in einer modularen Stahl-Leichtbauweise mit einem Tragskelett aus einem modularen Stecksystem aus Kastenprofilen erreicht. Das in Höhe und Länge erweiterbare System ist feuerverzinkt und mit einem aufgeschumpften Schraubkanal zur Aufnahme der Schrauben und Deckleiste bzw. für die Einbindung der PVT-Module versehen. Somit wird eine einfache Montage für frameless (randlose) Glas/Glas-Photovoltaik (PV)-Module mit dahinter applizierten Wärmeübertragungssystemen (Kapillarrohrmatten) ermöglicht. Diese innovative Konstruktion sorgt für eine effiziente Kühlung der Module, bei gleichzeitiger Speicherung der entstehenden Abwärme. Die gespeicherte Wärme kann zu einem späteren Zeitpunkt z. B. für die hydraulische Beet-Heizung genutzt werden, wodurch die Energieeffizienz des Systems maßgeblich gesteigert werden kann.



Abb. 19: Aufnahmen aus der Bauphase des Großdemonstrator-Gewächshauses: oben links: Bodenplatte mit Rahmenscheiben und Stützen vor der Montage, oben rechts: fertig montiertes Gewächshaus, unten: Dachkonstruktion mit Doppelverglasung ohne PVT-Module

Im Anschluss an die Montage der Stahlbaukonstruktion inklusive Doppelverglasung erfolgte die Fertigung der PVT-Module entsprechend der im Rahmen der Laboruntersuchungen entwickelten Fertigungstechnologie. Abbildung 20 zeigt exemplarisch ein M32-PVT-Modul bestehend aus einem Glas-Glas-PV-Modul und einer rückwärtig mittels Klebtechnologie applizierten Kapillarrohmatte. Die gefertigten PVT-Module wurden anschließend zum Standort transportiert und dort auf dem Dach montiert sowie an die elektrische und thermische Medienführung angeschlossen.



Abb. 20: Aufnahmen aus der Fertigung der PVT-Module (oben links) und der Montage entsprechend des Medine- und Verlegeplans, unten rechts: elektrische und thermische Medienführung im Firstbereich

Parallel dazu erfolgte der Bau und die Installation der Hochbeete für den Anbau der zu untersuchenden Pflanzenkulturen. Abbildung 21 zeigt Bilder aus dem Fertigungsprozess. Zunächst wurden die Beete in einer gedämmten Stahlkonstruktionsausführung gefertigt. Anschließend wurden die erdgebundene und oberflächige pflanzennahe Strahlungsheizung installiert. Abschließend wurden die Hochbeete mit Erde gefüllt sowie die Setzlinge der Pflanzenkulturen in der vorgegebenen Versuchsabfolge angepflanzt. Abschließend erfolgte die Installation der Bewässerung sowie die Integration und Vernetzung der Sensorik für die Erfassung der Anbaubedingungen (Temperatur, Feuchte) und Aktorik für die Steuerung der Heizung und Bewässerung.



Abb. 21: Aufnahmen aus dem Fertigungsprozess der Hochbeete, links: Installation der erdgebundenen Strahlungsheizung V1, Mitte: Installation der pflanzennahen oberflächigen Strahlungsheizung V2

Abschließend erfolgte die Verlegung und Installation der für das Energiemanagement erforderlichen technischen Ausrüstung bestehend aus Leitungen, Rohren, Sensoren, Aktoren, Batteriespeicher, Wechselrichter sowie Schaltschrank inklusive Mess-, Steuer- und Regeleinheit. Abbildung 22 zeigt Aufnahmen des fertiggestellten Großdemonstrator-Gewächshauses aus der Monitoringphase, welche noch bis 2026 laufen wird.



Abb. 22: Solargewächshaus nach Fertigstellung in der Monitoringphase

4. Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen des FuE-Vorhabens wurden Konzeptlösungen für energieeffiziente Solargewächshäuser für den energieautarken Obst- und Gemüseanbau mittels regenerativ erzeugter Energieströme und intelligenter Verwertungstechnologie entwickelt. Darauf aufbauend wurden Technologien für die Umsetzung der entwickelten Konzeptlösungen erarbeitet und im Rahmen labortechnischer Untersuchungen am ISE im Freifeldversuch erprobt. In der finalen Entwicklungsstufe konnte ein

Großdemonstrator eines energieeffizienten Solar-Gewächshauses für die wissenschaftlich-technische Erprobung der entwickelten Konzeptlösungen im Rahmen von Monitoring-Untersuchungen entwickelt werden.

Um die Ergebnisse über einen erweiterten Zeitraum hinweg zu analysieren, wird die Erfassung und Auswertung von Daten im Rahmen eines umfassenden Monitorings über sämtliche Anbauphasen und Jahreszeiten in den kommenden Jahren fortgesetzt werden. In Zusammenarbeit mit landwirtschaftlichen Betrieben sollen detaillierte standort- und anbauabhängige Daten erfasst werden, die im späteren Produkt anwendungsfallspezifisch berücksichtigt werden können. In diesem Rahmen ist geplant, weitere unterschiedliche Gemüse- und Obstsorten im SolGreen-Gewächshaus anzubauen, um das Verständnis für unterschiedliche Anbaubedingungen zu vertiefen und die Bandbreite der gewonnenen Erkenntnisse zu erweitern. Damit werden die im Projekt gewonnenen Ergebnisse kontinuierlich validiert und ihre Nachhaltigkeit und Übertragbarkeit sichergestellt.

5. Literaturverzeichnis

- [1] BMU, „Die Klimakonferenz in Paris,“ [Online]. Available: <https://www.bmu.de/themen/klima-energie/klimaschutz/internationale-klimapolitik/pariser-abkommen/>.
- [2] European Commission, „Übereinkommen von Paris,“ [Online]. Available: https://ec.europa.eu/clima/policies/international/negotiations/paris_de.
- [3] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, „Abkommen von Paris,“ [Online]. Available: <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Artikel/Industrie/klimaschutz-abkommen-von-paris.html>.
- [4] Swissveg, „Was fällt ökologisch mehr ins Gewicht: Transportweg oder Produktion,“ [Online]. Available: <https://www.swissveg.ch/transport>.
- [5] T. Mangold und M. Bauer, „Nachhaltigkeit beim Lebensmitteltransport,“ HS Aalen, Aalen, (2015).
- [6] nachhaltig-sein.info, „Lebensmittel-Transporte mit dem Flugzeug: Eine Infografik,“ [Online]. Available: <https://nachhaltig-sein.info/privatpersonen-nachhaltigkeit/wirkung-von-lebensmittel-transporten-auf-umwelt-infografik>.
- [7] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit, „Was ist regionales Gemüse? Tipps für mehr Klimaschutz,“ [Online]. Available: <https://www.mein-klimaschutz.de/beim-einkauf/a/essen/was-ist-regionales-gemuese/>.
- [8] Verbraucherzentrale NRW e.V., „Regionale Lebensmittel,“ [Online]. Available: <https://www.verbraucherzentrale.de/wissen/lebensmittel/kennzeichnung-und-inhaltsstoffe/regionale-lebensmittel-11403>.
- [9] GBI-Genios Deutsche Wirtschaftsdatenbank GmbH, „Obst und Gemüse - regionale Herkunft gewinnt an Bedeutung,“ [Online]. Available: https://www.wiso-net.de/info/branchenwissen/obst_und_gemuese_regionale_herkunft_gewinnt_an_bedeutung.
- [10] K. Istel, „Regionale Lebensmittel - NABU,“ [Online]. Available: <https://www.nabu.de/umwelt-und-ressourcen/oekologisch-leben/essen-und-trinken/bio-fair-regional/labels/regio.html>.
- [11] H. Kögl, J. Tietze, C. Möller, G. Reinhardt und S. Mann, „Regionale Erzeugung, Verarbeitung und Vermarktung von Lebensmitteln,“ Rostock, (2009).
- [12] sharemen media GmbH, „Regionale Lebensmittel haben nicht immer eine gute Ökobilanz,“ [Online]. Available: <https://www.ecowoman.de/ernaehrung/essen/regionale-lebensmittel-oekobilanz-oft-schlecht-210>.

- [13] Verbraucherzentrale NRW e.V., „Regionale Lebensmittel,“ (2020). [Online]. Available: <https://www.verbraucherzentrale.de/wissen/lebensmittel/kennzeichnung-und-inhaltsstoffe/regionale-lebensmittel-11403>.
- [14] S. Meinert und M. Stollt, „Factsheet: ‚Ernährung und Klima‘“.
- [15] FAKT AG, „GAP – Gesunde Agrarprodukte/Gewächshausparks,“ [Online]. Available: <https://www.fakt-ag.com/gap-gesunde-agrarprodukte-gewaechshausparks/>.
- [16] U. Poetsch, „Nachhaltige Ernährung: Aus der Region und nach der Saison – Vorteile für Verbraucher,“ [Online]. Available: <https://www.dlr.rlp.de/Internet/global/themen.nsf/0/D58A32E6A3826437C1257727004728C8?OpenDocument>.
- [17] M. Müller-Lindelauf, G. Zipfel, N. Rettenmaier, S. Gärtner, J. Münch, D. Paulsch und G. Reinhardt, „CO₂-Fußabdruck und weitere Umweltauswirkungen von Gemüse aus Baden-Württemberg,“ ifeu - Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH, Heidelberg, (2013).
- [18] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU), „Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU),“ (2021). [Online]. Available: <https://www.bmu.de/themen/klima-energie/klimaschutz/eu-klimapolitik/>.
- [19] European Commission, „Klima- und energiepolitischer Rahmen bis 2030,“ [Online]. Available: https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2030_de.
- [20] Umweltbundesamt, „Treibhausgasminderungsziele Deutschlands,“ (2021). [Online].
- [21] BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND ENERGIE, „Deutsche Klimaschutzpolitik,“ [Online]. Available: <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Artikel/Industrie/klimaschutz-deutsche-klimaschutzpolitik.html#:~:text=Zentrales%20Ziel%20der%20deutschen%20Klimaschutzpolitik,dem%20Jahr%201990%20reduziert%20werden>.
- [22] Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft, „BMEL-Statistik: Produktionsgartenbau,“ [Online]. Available: <https://www.bmel-statistik.de/landwirtschaft/gartenbau/produktionsgartenbau/>.
- [23] Syed, A. M., Hachem, C.: Review of Construction; Geometry; Heating, Ventilation, and Air-Conditioning; and Indoor Climate Requirements of Agricultural Greenhouses. *Journal of Biosystems Engineering* 44 (2019), S. 18–27.
- [24] LfL, Redaktion: Dr. Gerald Lattauschke: Ökonomische Betrachtungen zum Anbau von Gemüse im Gewächshaus.

Decentralized Biomethanol Production – Biogeniv

Martin Hayduk , Romy Sommer, Edward Antwi*, Johannes Gulden
Stralsund University, Institute for Renewable Energy Systems (IRES),
Zur Schwedenschanze 15, 18435 Stralsund, Germany

* Corresponding author's email address: edward.anwti@hochschule-stralsund.de

Abstract

Biomethanol produced from the hydrogenation of biogenic carbon dioxide and green hydrogen is considered a fuel, a base chemical to produce other chemicals, and a hydrogen storage medium. The overarching aim of this project is to develop concepts for the transformation of renewable energies into energy storage media with a special focus on decentralizing the production process to produce biomethanol from biogenic carbon dioxide and green hydrogen. The work presents initial results obtained from running a 4.5 l/day pilot biomethanol plant designed and constructed by the Institute of Renewable Energy Systems in Stralsund-Hochschule. The pilot plant was operated at three different pressures and temperature ranges to determine the yield of methanol. The initial results show that the best yield of methanol was obtained at a temperature of 240 °C and 40 bar. ASPEN Plus V14 was used to develop a model based on the kinetic model of Vanden Busche. The overall results will feed into the design of a containerized decentralized plant to produce about 25 l/day of biomethanol.

Background

The current shift to renewable energy presents opportunities and challenges. The intermittent nature of renewable energy means that excess power generated must be stored, converted to other energy carriers, or wasted. Thus, the need for sector coupling and the development of storage media for power from renewable energy plants has become a central theme of the second phase of Germany's energy transition [1]. Further, the need to decentralize power generation sources to meet the demands of end users has become a cardinal point in the energy transitional process of Germany. As part of the WIR project biogeniV, the region of East Mecklenburg- Western Pomerania is to be developed into a national innovation center in the field of biomethanol production and its use in the medium to long term. The innovations pursued in the joint project bV-A1 are intended to contribute to strengthening structural change in the alliance region, as new technological solutions are developed that are tailored to the regional and national challenges in the area of greenhouse gas emission reduction and energy independence. Biomethanol - produced from electrolysis hydrogen and biogenic CO₂ - thus opens new opportunities in economic sectors in which the established technologies cannot yet offer a technical solution for the supply of renewable energy, such as heavy-duty transport, agriculture, shipping, and aviation [2] These areas are still far behind the originally targeted CO₂ savings. In addition to a switch to sustainable energy sources and saving CO₂ emissions, processes and technologies for producing biomethanol will also be able to initiate structural change, as they form the basis for new business models in the alliance region and beyond [3]. Decentralized biomass processing facilities already have a significant impact on the region of the partners on this project and are an important part of the energy and waste management strategy of the region. This sector will receive new growth impulses through the innovations developed under this project. Since methanol (MeOH) is already in liquid form and has a high energy density under ambient conditions compared to other renewable energy sources (hydrogen, methane, ammonia), it is easier and more efficient to store and transport using existing infrastructure [4]. The hydrogenation of carbon dioxide to produce biomethanol has been the subject of several studies. While some studies have sought to understand the kinetics of the reactions involved and develop models[5], others have looked at the role of catalysts and the effect of different catalyst formulations on CO₂ conversion and methanol selectivity [6,7]. Other studies have also focused on parametric studies, taking a deeper dive to understand the effect of process parameters – temperature,

pressure, stoichiometric ratios of carbon dioxide and hydrogen on the reaction kinetics leading to methanol yield. Lombardelli et al. [8], investigated the effect of reaction pressure, gas hourly space velocity, and the stoichiometric ratios of H₂ and CO₂ at isothermal reactor conditions (250 °C) and reported methanol yield between 3 and 13% depending on the reaction condition. Despite the numeral studies that have been conducted in the previous years, only a few have focused on building and testing a pilot biomethanol plant. Thus, the overarching aim was to draw from the experience of operating a pilot methanol plant to enable the design of a new decentralized biomethanol plant.

Materials and methods

The pilot plant was run on hydrogen obtained from an alkaline electrolysis plant powered by a 30 kW wind turbine generator installed on the compound of the Institute for Renewable Energy Systems (IRES). Carbon dioxide was obtained from an industrial supplier of specialty gases. Industrial formulated Cu/ZnO/Al₂O₃ catalyst obtained from BASF was used. The catalyst was first ground into small particle size to enable it to fit into the reactor tubes. A plug flow reactor consisting of 19 tubes each with an inner diameter of 7 mm was used. The length of the reactor is about 1 m long. To heat the reactor and ensure uniform heat distribution inside the reactor, an industrial thermal fluid (Fragoltherm HT) was used. The thermal fluid was heated up in a different tank and the heated oil was circulated around the reactor tubes using a pump. To determine the yield of methanol and gain a better understanding of the reaction conditions with regard to the operating temperatures, a parametric study was carried out. The operating temperature, the operating pressure, and the stoichiometric ratios of CO₂ and H₂ were varied. Further to understand the reaction pathways and mechanisms, the composition of the unreacted gases that were recycled back into the reactor was determined. This was carried out in an external laboratory using Gas Chromatography to determine the product selectivity of the catalyst as well as gain a deeper understanding of the reaction pathways inside the reactor. Lastly, using Aspen Plus 14, a steady-state model was built (Fig. 1).

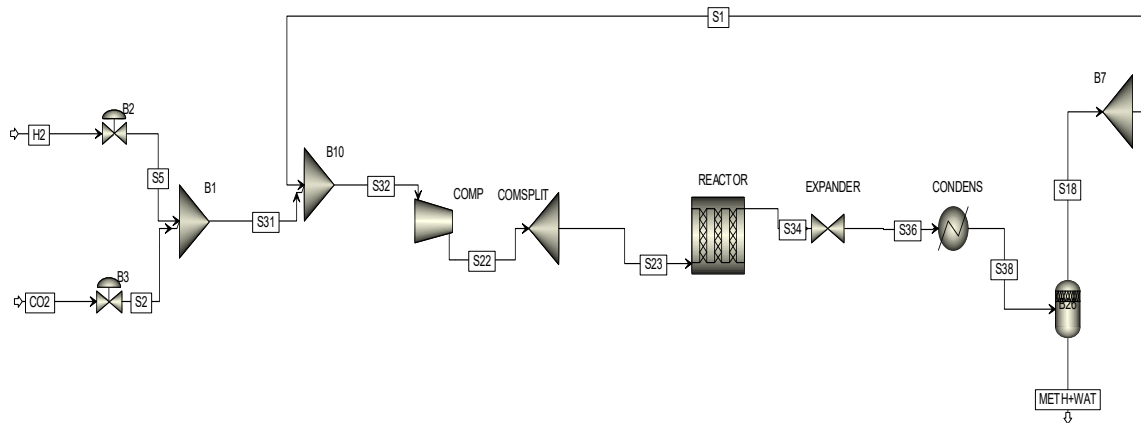


Figure 1: Process flow diagram

The reaction kinetics was based on the Busche kinetic model (Equations 3 and 4) [9,10] according to the reaction as expressed in Equations (1) and (2)[10,11]. The kinetic constants used were obtained from Frilund [12]



$$R_{\text{methanol}} = \frac{K_1 P_{CO_2} P_{H_2} - K_6 P_{H_2} P_{CH_3OH} P_{H_2}^{-2}}{(1 + K_2 P_{H_2} P_{H_2}^{-1} + K_3 P_{H_2}^{0.5} + K_4 P_{H_2} O)^3} \quad (3)$$

$$R_{rwgs} = \frac{K_5 P_{CO_2} - K_7 P_{H_2O} P_{CO} P_{H_2}^{-1}}{1 + K_2 P_{H_2O} P_{H_2}^{-1} + K_3 P_{H_2}^{0.5} + K_4 P_{H_2O}} \quad (4)$$

Result and discussions

The result of the gas chromatography analysis presented in Tab. 1 shows that the fraction of methanol in the product stream ranged between 59 – 61%. The highest fraction of methanol was obtained when the reaction temperature was 240 °C and 40 bar with a CO/H₂ stoichiometric ratio of 1:4. On the other hand, there was a slight reduction in the yield of methanol when the temperature was increased to 260 °C. A similar result was obtained when the pressure was increased to 50 bar while maintaining the process temperature at 240 °C. The fraction of methanol yield recorded agrees with the stoichiometric metric yield of methanol in terms of the mass fraction according to Equation 1. The initial experimental result show the minimal role the reverse water gas shift reaction plays in the reaction mechanism. A prominent reaction mechanism involving the reserve water gas shift reaction will lead to increased production of an additional mole of water which will lead to the reduction of the methanol mass fraction in the product stream. On the contrary, the result of the model seems to suggest that the reserve water gas shift reaction plays a very important role in the reaction mechanism where the selectivity of carbon monoxide is promoted. This could be the reason why the mass fraction of methanol in the product streams of the model is lower than the experimental result. While an increase in reaction temperature has a thermodynamic limiting factor on the reaction kinetics, an increase in pressure and lower temperature favors the production of methanol according to the Le Chatelier principle [13].

Tab. 1: Methanol yield in product stream

	Exp. 1	Model 1	Exp. 2	Model 2	Exp. 3	Model 3
Operating Conditions (°C/bar)	240/40	240/40	260/40	260/40	240/50	240/50
Methanol yield, (% w/w)	61	45	44	36	59	40
Water yield, (% w/w)	39	55	56	64	41	60

Analysis of the unreacted gases after the products have been separated revealed several interesting compounds (Fig. 2). The presence of carbon monoxide in the product stream confirmed the selectivity of carbon dioxide in the reaction mechanism. The lowest fraction of carbon dioxide in the recycled gas stream was obtained at a reactor operating conditions of 240 °C and 40 bar. This notwithstanding, the highest CO composition was obtained at 260 °C and 40 bar. The initial result shows higher operating temperatures favor carbon monoxide selectivity leading to a higher fraction of carbon monoxide in the recycled gas stream. This is consistent with the theory that endothermic reactions are favoured by increased reaction temperatures according to the Le Chatelier principle. A high carbon monoxide concentration means reduced methanol selectivity and rather the cracking of carbon dioxide according to the reverse water gas shift reaction. Further, a high carbon monoxide concentration in the recycled gases means the consumption of more hydrogen to produce water which is not a desired product in this process. Thus, lower carbon monoxide concentration in the recirculated gas stream is most desirable. Additionally, in all instances, the fraction of hydrogen gas in the recirculated stream was the highest, an indication that these unreacted gases cannot be discarded but rather recycled back into the reactor to increase overall process efficiency.

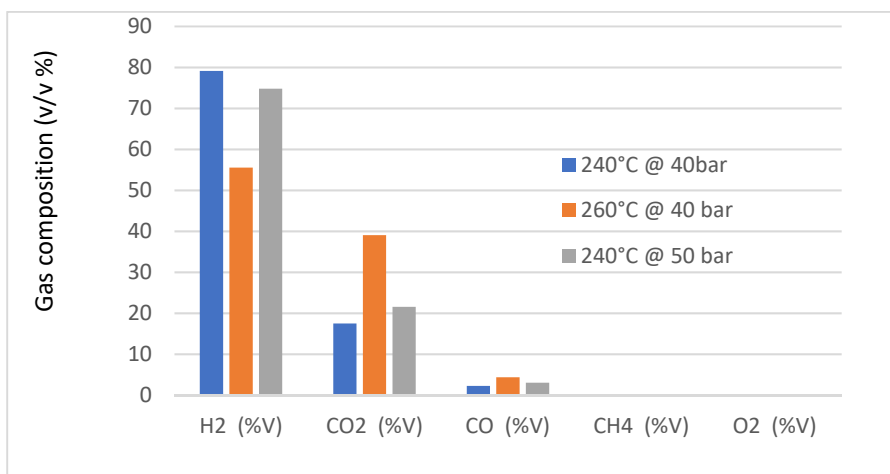


Figure 2: Composition of recycled gases after the reaction

Further analysis of the product stream revealed the presence of many compounds that hitherto were not present in the feed gases or duly represented in the governing reaction equations (Fig. 3). This goes to confirm the presence of multiple side reactions taking place in the reactor. Of particular interest was the presence of ethanol and other alcohols and ketones. The formation of longer carbon chain alcohols is governed by the Fischer-Tropsch reaction mechanism according to Pour et al [14]. The Fischer-Tropsch reaction is made possible due to the cracking of CO₂ into CO[15]. The low production of longer-chain alcohols and ketones could be a result of the lower selectivity of the catalyst to CO production thus limiting the amount of and type of longer-chain alcohols produced. The result showed that except for methyl formate the production of all the other higher chain alcohols and hydrocarbons was highest during reaction temperature of 260 °C and 40 bar. This seems to suggest that higher temperature favours the cracking of the CO₂ into CO and the selectivity of CO which eventually leads to the formation of longer chain alcohols and longer chain hydrocarbons. The result is corroborated by other researchers who reported comparatively higher amounts of higher carbon chain alcohols and hydrocarbons at higher reaction temperatures [16,17].

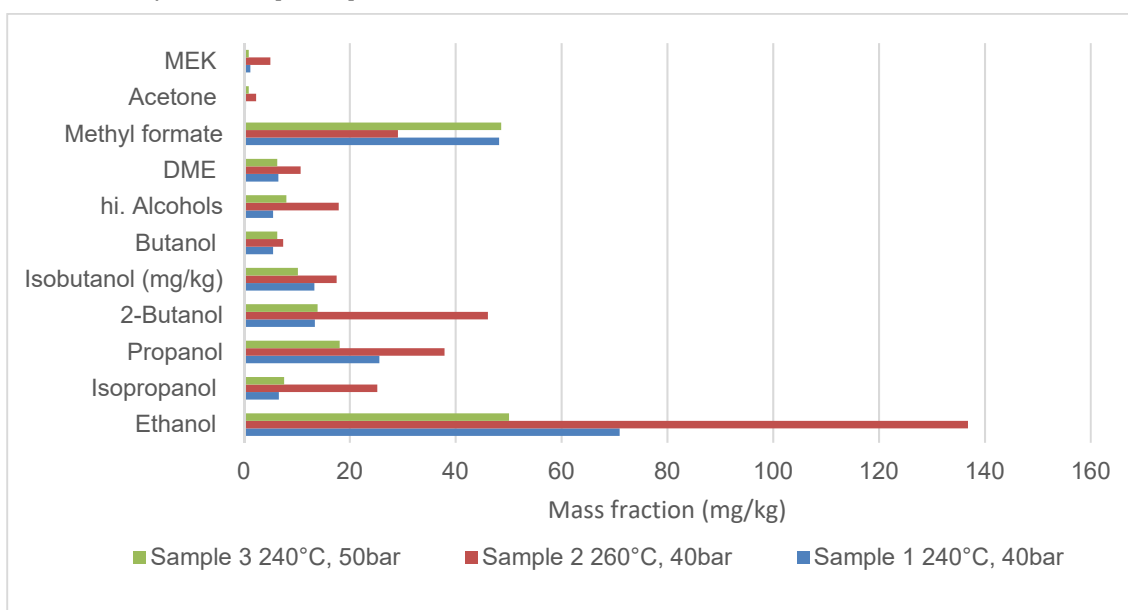


Figure 3: Compositional analysis of product stream

The Biogeniv project

The initial result obtained from running the pilot plant goes to support the Biogeniv Project which seeks to leverage the unique position of East Mecklenburg- Western Pomerania as a renewable energy enclave to kickstart the biomethanol economy. The initial results together with further studies being carried out will feed into the design of the new pilot mobile and decentralized biomethanol plant (Fig. 4). The project will seek among other things to couple the plant directly to a biogas plant which will enable the utilization of carbon dioxide from the biogas plant to produce methanol. Aside from this, the project will also seek to develop a new membrane reactor to allow for the in-situ separation of methanol and water. This will be a game changer as it will reduce or reduce the cost of methanol–water mixture separation which could be expensive due to the heat load required as is the case with most atmospheric distillation units. Additionally, the project is looking at using the results obtained from the previous pilot plant to develop a more efficient catalyst with a high CO₂ conversion rate and methanol selectivity to increase the yield of methanol.

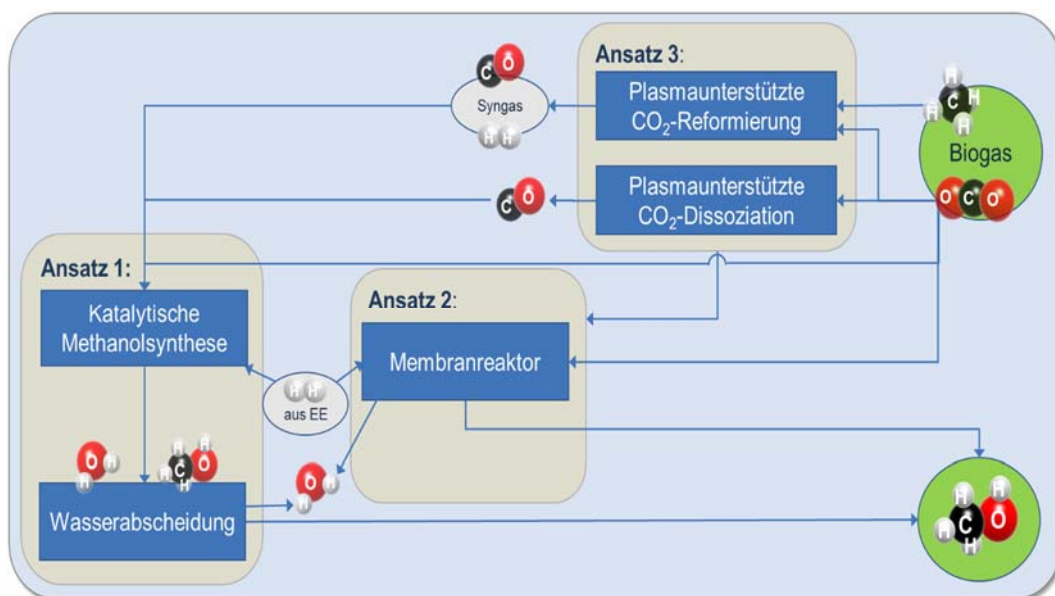


Figure 4: Biogeniv project concept

Conclusion and Recommendations

Biomethanol is expected to be the energy carrier of the future and the building blocks of an industrial economy built around methanol. The Biogeniv project seeks to leverage the rich biomass and energy resources in the East Mecklenburg- Western Pomerania region to produce methanol and use methanol to industrially transform the economy of the region. The initial result obtained from running the pilot plant developed and constructed at IRES shows that biomethanol can be produced by hydrogenating carbon dioxide. Further experiments are being conducted to study the kinetics of the reaction, model, and optimize the process. The subsequent design, construction, and operation of the decentralized biomethanol plant will serve as a useful demonstration unit to further learn and develop the skills to upscale the units.

References

- [1] Key Facts about the Energy Transition in Germany, n.d.
- [2] T. Paulauskiene, M. Bucas, A. Laukinaite, Alternative fuels for marine applications: Biomethanol-biodiesel-diesel blends, *Fuel*. 248 (2019) 161–167. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.03.082>.

- [3] P. Parkhey, Biomethanol: possibilities towards a bio-based economy, *Biomass Convers Biorefin.* 12 (2022) 1877–1887. <https://doi.org/10.1007/s13399-021-01907-x>.
- [4] US Department of Transportation, 5584641, 1985. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/https://www.osti.gov/servlets/purl/5584641 (accessed December 19, 2023).
- [5] F. Nestler, A.R. Schütze, M. Ouda, M.J. Hadrich, A. Schaadt, S. Bajohr, T. Kolb, Kinetic modelling of methanol synthesis over commercial catalysts: A critical assessment, *Chemical Engineering Journal.* 394 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.124881>.
- [6] A. Xin, Z. Yizan, Z. Qiang, W. Jinfu, Methanol Synthesis from CO₂ Hydrogenation with a Cu/Zn/Al/Zr Fibrous Catalyst *, 2009.
- [7] P. Sharma, J. Sebastian, S. Ghosh, D. Creaser, L. Olsson, Recent advances in hydrogenation of CO₂ into hydrocarbons via methanol intermediate over heterogeneous catalysts, *Catal Sci Technol.* 11 (2021) 1665–1697. <https://doi.org/10.1039/d0cy01913e>.
- [8] G. Lombardelli, M. Mureddu, S. Lai, F. Ferrara, A. Pettinau, L. Atzori, A. Conversano, M. Gatti, CO₂ hydrogenation to methanol with an innovative Cu/Zn/Al/Zr catalyst: Experimental tests and process modeling, *Journal of CO₂ Utilization.* 65 (2022) 102240. <https://doi.org/10.1016/J.JCOU.2022.102240>.
- [9] K.M. Vanden Bussche, G.F. Froment, A Steady-State Kinetic Model for Methanol Synthesis and the Water Gas Shift Reaction on a Commercial Cu/ZnO/Al₂O₃ Catalyst, 1996.
- [10] O. Mäyrä, K. Leiviskä, Modeling in Methanol Synthesis, in: *Methanol: Science and Engineering*, Elsevier, 2018: pp. 475–492. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63903-5.00017-0>.
- [11] M. Asif, X. Gao, H. Lv, X. Xi, P. Dong, Catalytic hydrogenation of CO₂ from 600 MW supercritical coal power plant to produce methanol: A techno-economic analysis, *Int J Hydrogen Energy.* 43 (2018) 2726–2741. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.12.086>.
- [12] master_Frilund_Christian_2016, (n.d.).
- [13] S.S. Iyer, T. Renganathan, S. Pushpavanam, M. Vasudeva Kumar, N. Kaisare, Generalized thermodynamic analysis of methanol synthesis: Effect of feed composition, *Journal of CO₂ Utilization.* 10 (2015) 95–104. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2015.01.006>.
- [14] A.N. Pour, M.R. Housaindokht, H. Monhemi, A new LHHW kinetic model for CO₂ hydrogenation over an iron catalyst, *Progress in Reaction Kinetics and Mechanism.* 41 (2016) 159–169. <https://doi.org/10.3184/146867816X14628763021337>.
- [15] U.J. Etim, Y. Song, Z. Zhong, Improving the Cu/ZnO-Based Catalysts for Carbon Dioxide Hydrogenation to Methanol, and the Use of Methanol As a Renewable Energy Storage Media, *Front Earth Sci (Lausanne).* 8 (2020). <https://doi.org/10.3389/fenrg.2020.545431>.
- [16] D. Xu, Y. Wang, M. Ding, X. Hong, G. Liu, S.C.E. Tsang, Advances in higher alcohol synthesis from CO₂ hydrogenation, *Chem.* 7 (2021) 849–881. <https://doi.org/10.1016/j.chempr.2020.10.019>.
- [17] Y. He, S. Liu, W. Fu, C. Wang, C. Mebrahtu, R. Sun, F. Zeng, Thermodynamic Analysis of CO₂ Hydrogenation to Higher Alcohols (C₂-4OH): Effects of Isomers and Methane, *ACS Omega.* (2022). <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c00502>

Erneuerbare Energiesysteme in Industrie- und Gewerbegebieten: Technologien und Modellierungsansatz

Ann-Kathrin Weidlich, Anne Schierenbeck

Institut für Management, Kultur und Technik der Hochschule Osnabrück, Lingen

Abstract

Unternehmen als maßgebliche Energieverbraucher nehmen eine Schlüsselrolle ein bei der Neugestaltung von Energiesystemen. Dabei können durch die Zusammenarbeit benachbarter Unternehmen Synergien erschlossen werden. Ziel dieses Projektes ist die Schaffung einer techno-ökonomischen Datengrundlage in Hinblick auf verfügbare Technologien zur Modellierung und Optimierung dezentraler Energiesysteme für Industrie- oder Gewerbegebiete. Es werden Daten aus der Literatur extrahiert und systematisch zu einem Datensatz zusammengeführt. Dieser umfasst technologiespezifische technische wie wirtschaftliche Kennzahlen zum heutigen Zeitpunkt sowie je eine Prognose der Entwicklung bis 2045/2050. Die Analyse zeigt, dass Investitionskosten technologieabhängig über die Zeit variieren, während Wartungs- und Betriebskosten sowie Lebensdauer und Wirkungsgrad technologieübergreifend ähnliche Tendenzen der Stagnation oder Minimierung aufweisen.

1. Ausgangslage und Problemstellung

Das Klimaschutzgesetz [1] verankert das Pariser Abkommen in Form eines Klimaneutralitätsziels für 2045 in der nationalen Gesetzgebung. Dieses Ziel gilt ebenso für den Sektor Industrie. Dazu sind die erneuerbaren Energien auszubauen und die Energieeffizienz zu steigern. [Vgl. 2, S. 1] Die Energiewende sorgt für eine Neugestaltung von Energiesystemen. [Vgl. 3, S. 6] Das Energiesystem wird durch die variable räumliche Verteilung der erneuerbaren Energieerzeugung, die Heterogenität der Akteure und die Vielfalt an Technologien beeinflusst. Zunehmend steigen die Komplexität und Dezentralität. Es besteht Forschungsbedarf bei der Ermittlung und Bewertung der optimalen Ausprägung der betrieblichen Energieversorgung, der verbundenen Kosten und der Versorgungssicherheit, wenn Energie durch kleine lokale Einheiten, z.B. im räumlichen Zusammenhang eines Gewerbe- oder Industriegebiets, flexibel bereitgestellt werden soll. [Vgl. 4, S. 97-99]

Unternehmen nehmen eine Schlüsselrolle in der Energiewende ein. Mit 699 TWh (2021) hat die Industrie einen Anteil von 29 % am Endenergieverbrauch [Vgl. 5]. Unternehmen selbst widmen sich in unterschiedlicher Intensität und mit individuellen Maßnahmen dem Klimaschutz. Ergebnisse aus einem Vorgängerprojekt zeigen auf, welche Technologien dabei zur Versorgung eines Unternehmens mit Prozesswärme, Gebäudewärme sowie Strom optimalerweise eingesetzt werden sollten. [Vgl. 6] Unternehmen nutzen idealerweise ihre Dachflächen für die Stromproduktion und Wärmepumpen für die Erzeugung von Gebäudewärme. Im Bereich der Prozesswärme ist das Ergebnis nicht so eindeutig, sondern hängt stark von der Entwicklung der Energiepreise ab.

Davon ausgehend, dass Unternehmen häufig in einer hohen lokalen Dichte in Industrie- und Gewerbegebieten vertreten sind, ergibt sich ein räumlicher Zusammenhang, der ein lokales dezentrales Energiesystem begünstigt. Dieser Ansatz der Energiegemeinschaft könnte unternehmerische Risiken minimieren und die Technologieakzeptanz bei der Umsetzung der Energiewende steigern. Zusätzlich könnte über die energetische Kopplung ein bisher weitestgehend ungenutztes Potential ausgeschöpft werden, dass Unternehmen sich gegenseitig mit Energie und Speicherkapazitäten versorgen. Jedoch erhöht dieser Ansatz gleichzeitig die Komplexität. Das zu

untersuchende System „Industriegebiet“ besteht aus verschiedenen Akteuren in unterschiedlichen Umfeldern, die zwischen verschiedenen alternativen Technologien wählen können.

Um Handlungsoptionen trotz komplexer Strukturen ableiten zu können, eignet sich die Abbildung von komplexen Systemen in Modellen. [Vgl. 7, S. 6-7] Die Modellierung und Analyse solcher komplexen Energiesysteme erfordern den Einsatz zeitlich und räumlich aufgelöster Modelle. Energiesystemmodelle bilden beispielsweise eine quantitative Grundlage für Entscheidungsfindungen und dienen als Instrument zur Planung von energiepolitischen, -wirtschaftlichen oder -technischen Maßnahmen. [Vgl. 7, S. 1-3]

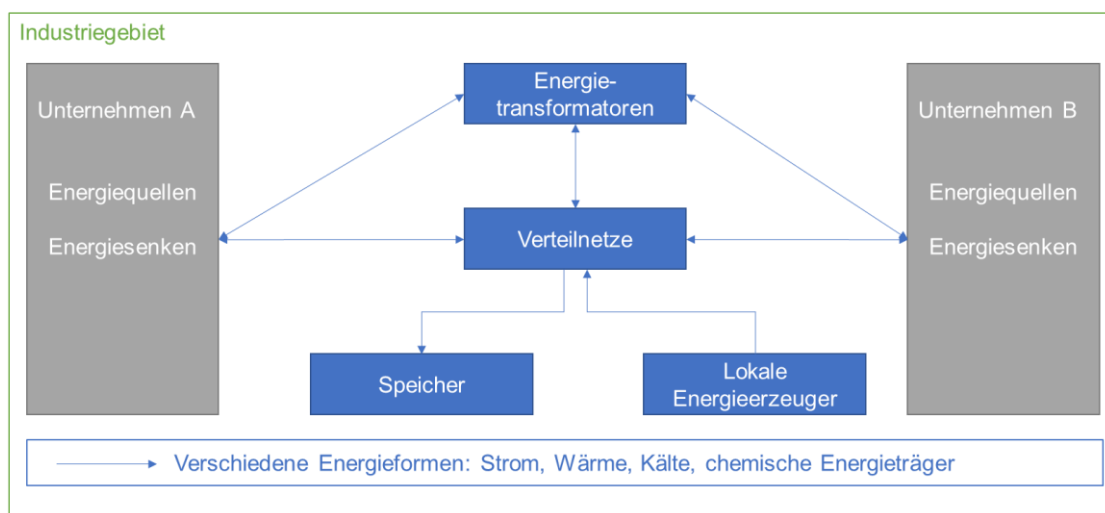


Abb. 1: Modellansatz eines dezentralen Energiesystems zur Schaffung einer energetischen Gemeinschaft in einem Industriegebiet

Die Abbildung 1 skizziert einen ersten Modellansatz. Hier liegt der Fokus darauf, den technischen und wirtschaftlichen Rahmen grob zu skizzieren und erste Erkenntnisse für die Planung zu gewinnen. Im Speziellen wird im Kontext dieses Papers die Energiesystemmodellierung als grundlegende Analyse- und Optimierungsmethode eingeordnet. Zu diesem Zeitpunkt ist der Detaillierungsgrad der technischen Anlagenkonzepts gering und die endgültige Investitionsentscheidung steht noch aus.

Um ein Energiesystem für ein Industrie- oder Gewerbegebiet zu entwickeln und zu optimieren, ist die Festlegung von Rahmendaten notwendig. Neben den energie- und prozessspezifischen Daten der Unternehmen eines Industrie- oder Gewerbegebiets sind techno-ökonomische Annahmen für Technologien im Bereich Erzeugung, Speicherung, Wandlung und Verteilung von Energie zu treffen. In der Literatur ist eine Vielzahl von techno-ökonomische Daten für Technologien zu finden. Gleichzeitig bildet diese Vielzahl in der Literatur auch die heterogene Landschaft der Technologien der Energiewende ab. Die Ergebnisse einer Energiesystemmodellierung hängen zudem vom Dateninput, wie den techno-ökonomische Technologiedaten, ab, sodass eine Ergebnisvergleichbarkeit zwischen verschiedenen Modellen eingeschränkt ist. Durch die Schaffung einer nutzbaren Datengrundlage wird die Vergleichbarkeit von Modellergebnissen erhöht.

2. Ziel

Das Ziel ist die Schaffung einer techno-ökonomischen Datengrundlage in Hinblick auf verfügbare Technologien zur Gestaltung eines dezentralen Energiesystems für ein Industrie- oder Gewerbegebiet. Dieser Datengrundlage wird im weiteren Projektverlauf als Dateninput für eine Energiesystemmodellierung mittels oemof dienen. Diese Energiesystemmodellierung verfolgt wiederum primär die ökonomische Optimierung des Systems.

Es soll zunächst die Frage beantwortet werden, welche Technologien für ein erneuerbares dezentrales Energiesystem für Industrie- und Gewerbegebiete Stand der Technik sind. Den identifizierten Technologien werden erste technologiespezifischen Eigenschaften zugeordnet. Neben technischen Attributen wie z.B. Wirkungsgrade bei der Umwandlung ist für die nachgelagerte ökonomische Optimierung zentral, die erforderlichen Investitionen (CAPEX) und Betriebskosten (OPEX) praxisnah zu ermitteln. Diese Daten werden aufbereitet und in Form eines Katalogs zusammengefasst.

Der Katalog ist unter <https://netcase.hs-osnabrueck.de/index.php/s/lfzh9lvLYKa2OvX> abrufbar.

3. Methodik

Es wird eine Metaanalyse bestehender Studien durchgeführt. Dabei wird ein strukturierter und systematischer Ansatz zur Erfassung sowie Analyse technischer und wirtschaftlicher Kennzahlen verschiedener Technologien der Energiewende verfolgt.

Zunächst erfolgt eine selektive Auswahl repräsentativer Literaturquellen, die einen breiten Querschnitt verschiedener Technologien abbilden. Dabei werden Veröffentlichungen aus 2015 bis 2023 berücksichtigt. Es werden sowohl Literaturquellen einbezogen, die Technologien identifizieren und clustern, als auch Literaturquellen, die konkrete Eigenschaften von Technologien beschreiben. Die identifizierten Technologien werden gesammelt.

Es werden Analyse Kriterien definiert, um auf qualitativer Ebene den Kontext der Literaturquelle und ihre Systematik der Technologiebeschreibung zu ermitteln. Darauf aufbauend werden Analyse Kriterien auf quantitativer Ebene abgeleitet, um die technischen und wirtschaftlichen Eigenschaften der Technologien den Literaturquellen zu entnehmen.

Folgende Kriterien stehen im Fokus zur qualitativen Analyse der Literaturquellen:

- Veröffentlichungsjahr
- Ziel/Verwendungszweck
- Methode der Datenerhebung
- Übergeordnete Technologiebereiche/-kategorien
- Art und Anzahl der beschreibenden Eigenschaften je Technologie
- Zeitliche Differenzierung der Eigenschaften je Technologie

Nach der detaillierten Einzelfallanalyse werden die Strukturierungssystematiken verglichen und eine Systematik für den Technologiekatalog extrahiert. Die identifizierten Technologien und ihre Eigenschaften werden entsprechend dieser Systematik strukturiert zusammengeführt und vergleichend gegenübergestellt.

4. Ergebnisse

4.1 Qualitative Analyse: Ableitung der Katalogstruktur

Aus der Literaturrecherche wurden acht Literaturquellen [8–15] identifiziert, die im Weiteren betrachtet werden.

Jede der Literaturquellen wendet eine überordnete Kategorisierung der Technologien auf ein bis zwei Ebenen an. Die Daten zu den Technologien stammen in allen Fällen aus Expertendiskussionen und Workshops [11, S. 17, 15, S. 6, 16, S. 2] in Teilen in Kombination mit Literaturrecherchen [8, S. 21, 10, 17, S. 19].

Der Verwendungszweck der Technologiesammlung ist je Literaturquelle vielfältig. Vier der Literaturquellen nutzen die Technologiesammlungen als Eingangsdaten für eine Modellierung:

- DEA22: Schaffung einer Datengrundlage zur Beurteilung der Entwicklung des Klima- und Energiesektors [9]
- REMod23: Ermittlung mittels Modellierung, wie eine klimaneutrale Energieversorgung und eine klimaneutrale industrielle Produktion in Deutschland 2045 gelingt (Energiesystemmodell REMod) [8, S. 20]
- KEA-BW22: Technikkatalog als Datenbasis zur kommunalen Wärmeplanung [10]
- Flex15: Ermittlung einer künftigen Struktur der Energieversorgung in Deutschland mittels Modellrechnungen, die trotz hohem Anteil erneuerbarer Energien ausreichend und kostengünstig die notwendige Flexibilität bereitstellt [11, S. 15]
- TF_Energiewende18: Aktueller Überblick über den Entwicklungsstatus, die Perspektiven in den unterschiedlichen relevanten Technologiebereichen des Energiesektors [17, S. 18]
- KSG204522: Analyse eines Treibhausgasreduzierungs Szenarios gemäß Bundes-Klimaschutzgesetz (KSG, „Netto-Null“ in 2045) unter Anwendung des Optimierungsmodells FINE.NESTOR der Modellfamilie ETHOS (Forschungszentrum Jülich (IEK-3)) [14, S. 1]
- REMod-D18: Modellinput zur Ermittlung einer technologischen Zusammensetzung des deutschen Energiesystems und seiner Entwicklung (bis 2050), welche bei geringstmöglichen gesamtsystemischen Kosten zu einer definierten Absenkung der Treibhausgasemissionen führt (Energiesystemmodell REMod-D) [15, S. 7]

Tabelle 1 zeigt je Literaturquelle und individueller Technologiekategorisierung die Anzahl der identifizierten Technologien, die Anzahl an dokumentierten Eigenschaften je Technologie sowie ihre zeitliche Differenzierung.

Tab. 1: Qualitative Auswertung der Fallbeispiele

Bezeichnung	Übergeordnete Technologiebereiche/-kategorien	Anzahl an Technologien	Anzahl der Eigenschaften je Technologie	Zeitliche Differenzierung der Eigenschaften je Technologie
DEA22	Technology Data for Generation of Electricity and District Heating	73	36 bis 336	2015, 2020, 2025, 2030, 2040, 2050
DEA22	Technology Data for Individual Heating Plants	45	135 bis 270	
DEA22	Technology Data for Renewable Fuels	36	84 bis 225	
DEA22	Technology Data for Carbon Capture, Transport and Storage	30		
DEA22	Technology Data for Energy Storage	9	76 bis 225	
DEA22	Technology Data for Industrial Process Heat	32	106 bis 132	
DEA22	Technology Data for Transport of Energy	23	15 bis 208	
DEA22	Technology Data for commercial freight and passenger transport	15		
REMod23	Stromerzeuger	10	21 bis 35	2020, 2025, 2030, 2035, 2040, 2045, 2050
REMod23	Energiewandler und Speicher	9		
REMod23	Heizungstechnologien – Wärmenetze	5		
REMod23	Heizungstechnologien – Einzelgebäude	20		
REMod23	Biomasse-Wandler	7		
REMod23	Antriebskonzepte Verkehr – Pkw und Lkw	22		
REMod23	Industrie (Prozesswärmeerzeugung) Niedertemperatur	8		
REMod23	Industrie (Prozesswärmeerzeugung) HT	9		
KEA-BW22	zentrale Wärmeversorgung	31	24 bis 105	2022, 2023, 2040
KEA-BW22	dezentrale Wärmeversorgung	90		
KEA-BW22	Wärmenetze	11		
KEA-BW22	Speichertechnologien	8		
Flex15	Fluktuierende Erzeuger	4	10 bis 32	2015
Flex15	Flexible Erzeugungstechnologien	11		
Flex15	Speichertechnologien und flexible Lasten	13		
TF_Energiewende18	Erneuerbare Energien	7	Qualitative Beschreibung hinsichtlich 12 Kriterien, in Teilen inkl. Abschätzung von CAPEX/ OPEX/ Nutzungsdauer	2018, 2020, 2040, 2050
TF_Energiewende18	Konventionelle Kraftwerke	5		
TF_Energiewende18	Infrastruktur	6		
TF_Energiewende18	Sektorkopplung	5		
TF_Energiewende18	Energie- und ressourceneffiziente Gebäude	1		
TF_Energiewende18	Energie- und Ressourceneffizienz in der Industrie	4		
TF_Energiewende18	Integrative Aspekte	4		
TF_Energiewende18	Techno-ökonomische Annahmen für ausgewählte erneuerbare Energien	5		
KSG204522	Techno-ökonomische Annahmen für Speichertechnologien	12	7 bis 16	2020, 2045
KSG204522	Techno-ökonomische Annahmen für ausgewählte Umwandlungstechnologien	20		
KSG204522	Techno-ökonomische Annahmen für ausgewählte Umwandlungstechnologien	20		
REMod-D18	Stromerzeuger	6	7 bis 8	2013, 2050
REMod-D18	Biomassewandler	8		
REMod-D18	Wärmenetze	6		
REMod-D18	Speichertechnologien und Sonstige	8		
REMod-D18	Gebäude und Heizungstechnologien	14		
REMod-D18	Verkehr	14		
REMod-D18	Verkehr	14		

Ausgenommen der Literaturquelle Flex15 [11] sind die Eigenschaften der Technologien alle zeitlich differenziert dokumentiert. Es ist anzumerken, dass abhängig vom Veröffentlichungsjahr das Jahr 2045 oder das Jahr 2050 zur Prognose herangezogen wird. Dies ist auf die Änderung des Klimaschutzgesetzes in 2021 zurückzuführen, welches in der aktuellen Fassung (§ 3 Abs. 2 KSG) eine Klimaneutralität für Deutschland in 2045 vorsieht statt vormals 2050 [1].

Auffällig sind zum Teil große Anzahlen von Technologien eines Technologiebereichs. Dies ist bei Anzahl an Technologien >15 darauf zurückzuführen, dass verschiedene Leistungsklassen einer Technologie separat ausgewiesen wurden. Außerdem ist die Anzahl der Eigenschaften je Technologie bei den Literaturquellen (REMod23, Flex15, KSG204522 und REMod-D18), die die Technologiedaten als Eingangsdaten für eine Modellierung nutzen, kleiner als bei den Fallbeispielen, die der allgemeinen Daten- bzw. Planungsgrundlage dienen. Der Verwendungszweck beeinflusst somit die Differenzierung der Technologiebeschreibung. Da das zukünftige Modell den Anspruch hat, eine technische und wirtschaftliche Entscheidungsgrundlage zu liefern, nicht aber eine detaillierte Anlagenplanung abdeckt, wird die Systematik der Technologiekatalogs an die modellorientierten Literaturquellen angelehnt.

Folgende Kriterien werden zur quantitativen Analyse der identifizierten Technologien abgeleitet:

- Bezeichnung
- Investitionskosten (CAPEX)
- M&O-Kosten (OPEX)
- Lebensdauer
- Wirkungsgrad

Neben den beschriebenen Eigenschaften einer Technologie werden die Technologien entlang einer übergeordneten Systematik gegliedert, wie in allen Literaturquellen erfolgt ist. Als Betrachtungszeitraum wird 2025 bis 2050 gewählt. Ältere Daten werden eliminiert, um die Komplexität des Katalogs zu senken, da hier der Fokus bei der Energiesystemmodellierung auf Zukunftsszenarien liegt. Abb. 2 zeigt die Struktur des Technologiekatalogs:

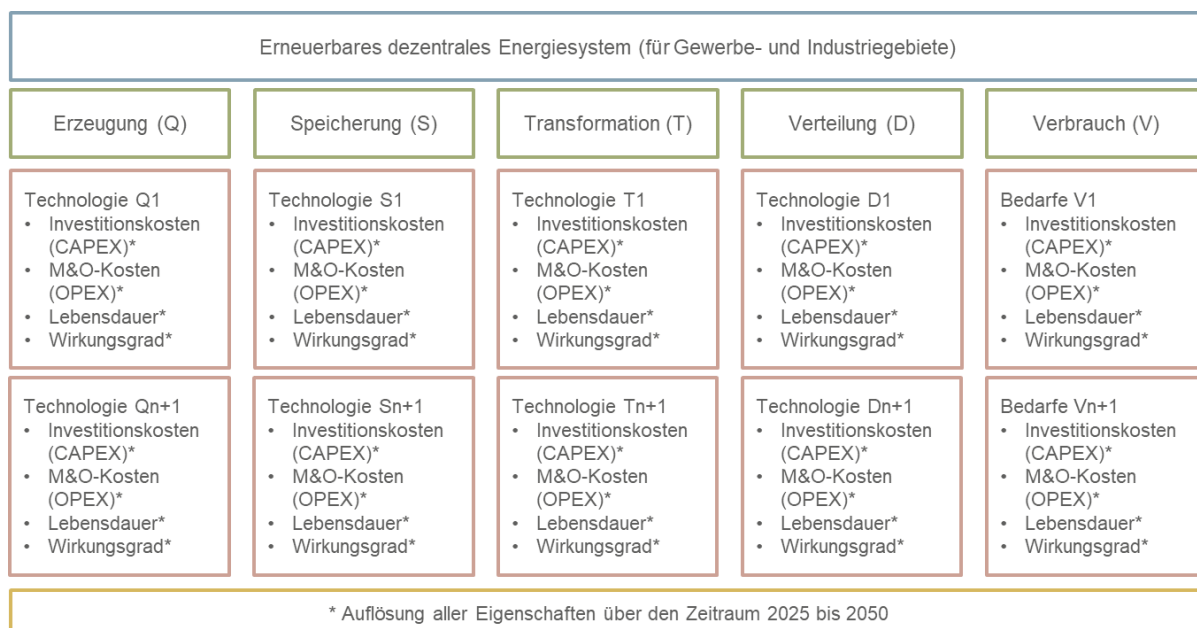


Abb. 2: Systematik des Technologiekatalogs

4.2 Quantitative Analyse: Bewertung der Technologieeigenschaften

Der quantitative Vergleich der Technologieeigenschaften zeigt ein heterogenes Bild in Hinblick auf die spezifischen Investitionskosten je Technologie, während Schätzungen über Lebensdauer, Wartungs- und Betriebskosten sowie Wirkungsgrad über alle Literaturquellen hinweg eine hohe Übereinstimmung aufweisen. Je Literaturquelle variieren die prognostizierten Investitionskosten je Technologie über die Zeit, während die Eigenschaft Wartungs- und Betriebskosten je Technologie überwiegend konstant über die Zeit abgebildet wird. Bei der Eigenschaft Wirkungsgrad einer Technologie werden technologieunabhängig Stagnation bis leichte Steigerungen prognostiziert (Abb. 3). Die Entwicklung der Eigenschaft Lebensdauer streut in einem größeren Bereich der positiven Lebensdauersteigerung in Relation zur Entwicklung des Wirkungsgrads (Abb. 4). Dies ist insbesondere auf die Prognose von Lebensdauerentwicklungen von Batterie- und Elektrolysetechnologien zurückzuführen.

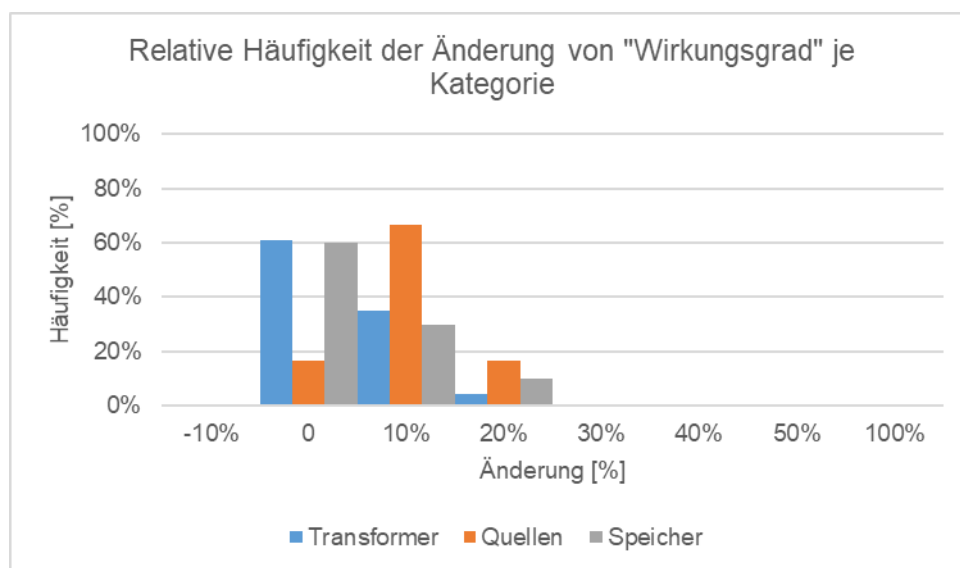


Abb. 3: Technologieübergreifende Entwicklung der Eigenschaft Wirkungsgrad

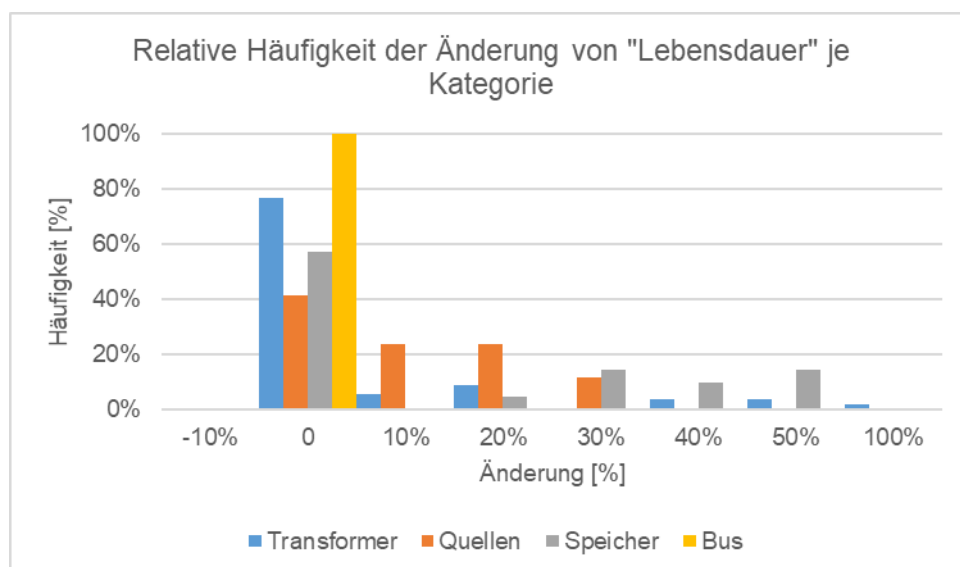


Abb. 4: Technologieübergreifende Entwicklung der Eigenschaft Lebensdauer

Die größte Investitionskostenminderung auf Basis der gewählten Literaturquelle weisen PV-Anlagen als Aufdachlösung und Freiflächenlösung auf. Im Mittel liegt die Kostenreduktion zwischen 2020 und 2050 bei 44% (Abb. 5).

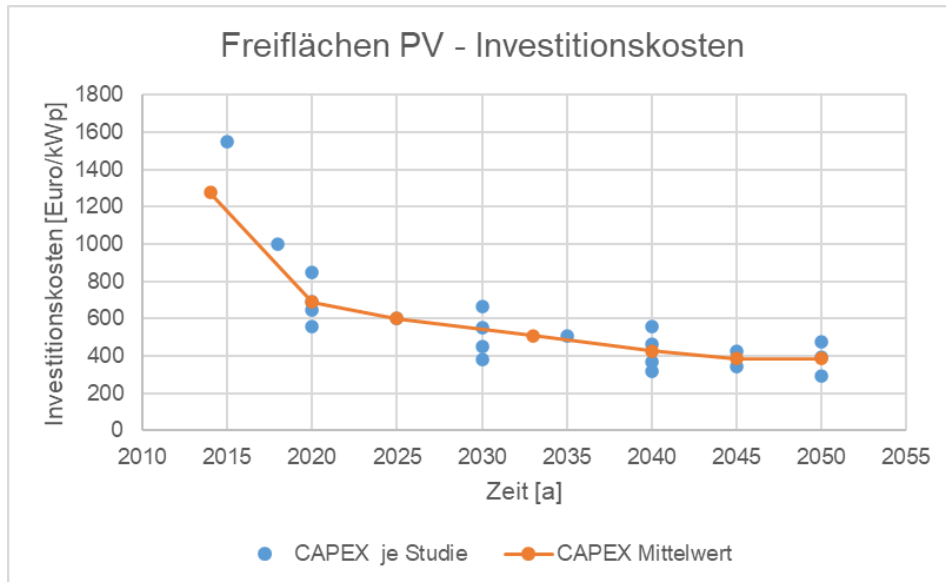


Abb. 5: Entwicklung der Investitionskosten für PV-Freiflächenanlagen

Wärmepumpen im Hoch- und Niedertemperaturbereich für dezentrale Anwendungen in Gebäuden und zentrale Anwendungen in Wärmenetzen werden bis 2045/2050 zwischen 25% bis 35% günstiger. Die größte Investitionskostenreduktion wird bei den Elektrolisetchnologien erwartet. Hier sinken die Investitionskosten zwischen 2020 und 2050 abhängig von der Technologie um 53% (AEC, 1 MW) bis 62% (AEC, 100 MW), im Mittel um 56% (Abb. 6).

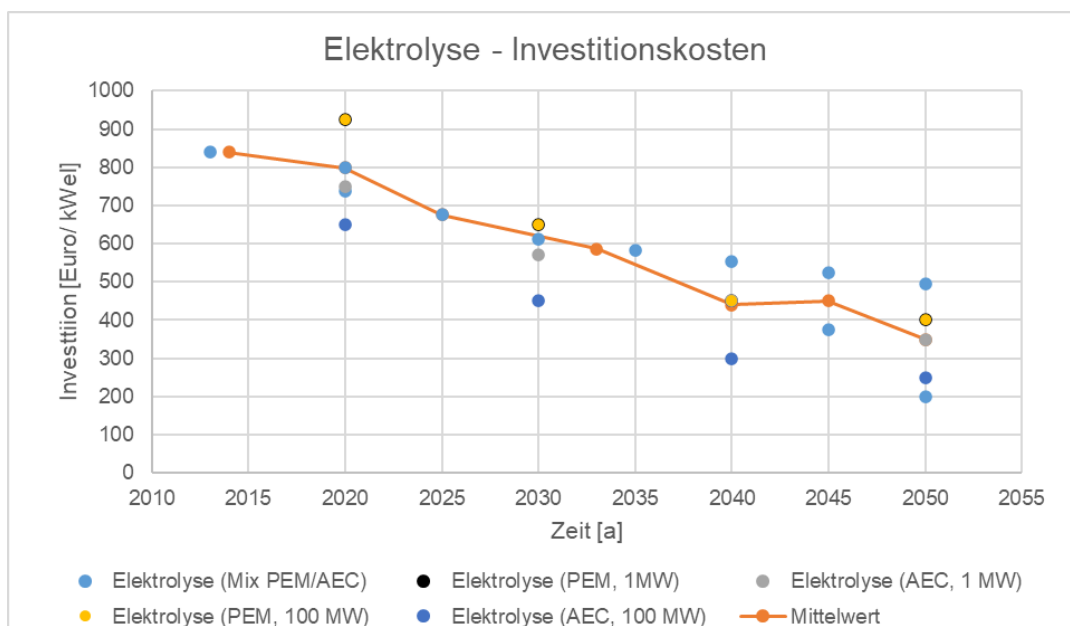


Abb. 6: Entwicklung der Investitionskosten für Elektrolysesysteme

5. Fazit

Ein Energiesystem ermöglicht eine gemeinsame Nutzung von erneuerbar erzeugter Energie, prozessbedingten Energiequellen sowie den gemeinsamen Betrieb entsprechender Anlagentechnik zur Energieverteilung, -Speicherung und -transformation. Das Energiesystem ist als Hybridnetz anzulegen, um Energien in ihrer Ausgangsform zu verbrauchen, zu speichern oder zu transportieren, aber auch durch Wandlung in andere Formen zu verbrauchen, zu speichern oder zu transportieren. Um diesen Modellansatz in ein wirtschaftliches Anlagenkonzept zu überführen, ist das Modell zum einen mit verbraucherspezifischen Daten wie typische Lastganglinien, Lastspitzen, Temperaturniveaus und Abwärmemengen zu versehen und zum anderen mit technologiespezifischen Eigenschaften und standortspezifischen Energieerzeugungsprofilen auszustatten. Der erhobene Technologiekatalog liefert einen Grundbaustein für diese Modellierung.

Um solch ein dezentrales Energiesystem für ein Gewerbe- oder Industriegebiet zu entwerfen und auf seine energetische und wirtschaftliche Effizienz zu prüfen, fehlen Unternehmen sowie Kommunen Anreiz und Praxiserfahrung, und ist daher Ausgangspunkt für weitere Analysen an konkreten Industrie- und Gewerbegebieten.

6. Literaturverzeichnis

- [1] *Bundes-Klimaschutzgesetz: KSG*, 2019. Zugriff am: 4. Januar 2024. [Online] Verfügbar: <https://www.gesetze-im-internet.de/ksg/>
- [2] Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz. "Entwurf eines Klimaschutzprogramms 2023 der Bundesregierung." Zugriff am: 4. Januar 2024. [Online] Verfügbar: https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/klimaschutz/entwurf-eines-klimaschutzprogramms-2023-der-bundesregierung.pdf?__blob=publicationFile&v=6
- [3] Agora Energiewende, onsentec GmbH und Regulatory Assistance Project. "Zukünftige Anforderungen an eine energiewendegerechte Netzkostenallokation." Zugriff am: 4. Januar 2024. [Online] Verfügbar: <https://www.agora-energiewende.de/veroeffentlichungen/zukuenftige-anforderungen-an-eine-energiewendegerechte-netzkostenallokation/>
- [4] acatech, Leopoldina und Akademienunion, Hg. *Zentrale und dezentrale Elemente im Energiesystem: Der richtige Mix für eine stabile und nachhaltige Versorgung* (Schriftenreihe zur wissenschaftsbasierten Politikberatung). München, Halle (Saale): acatech, Deutsche Akademie der Technikwissenschaften e.V.; Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina e.V., 2020.
- [5] Umweltbundesamt. "Energieverbrauch nach Energieträgern und Sektoren." Zugriff am: 4. Januar 2024. [Online] Verfügbar: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/energie/energieverbrauch-nach-energietraegern-sektoren#allgemeine-entwicklung-und-einflussfaktoren>
- [6] A. Schierenbeck, Wawer, T., Baars, J. und Gothe, T., Klostermann, S. "Klimaneutrale Energieversorgung - Strategien für kleine und mittlere Unternehmen: Publikation im Rahmen des Projekts Regio PLUS." Zugriff am: 4. Januar 2024. [Online] Verfügbar: <https://www.hs-osnabrueck.de/regio-plus/ergebnisse/>
- [7] J. Nagel, *Optimierung von Energieversorgungssystemen: Modellierung, Programmierung und Analyse*, 1. Aufl. Cham: Springer Nature Switzerland; Imprint Springer Vieweg, 2023.
- [8] M. Ragwitz *et al.*, *Szenarien für ein klimaneutrales Deutschland: Technologieumbau, Verbrauchsreduktion und Kohlenstoffmanagement* (Schriftenreihe Energiesysteme der Zukunft). München, Halle (Saale), Mainz: acatech - Deutsche Akademie der Technikwissenschaften; Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina; Union der deutschen Akademien der Wissenschaften, 2023. Zugriff am: 11. Dezember 2023. [Online] Verfügbar: <http://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:gbv:3:2-939044>
- [9] The Danish Energy Agency (DEA). "Technology Data." Zugriff am: 11. Dezember 2023. [Online] Verfügbar: <https://ens.dk/en/our-services/projections-and-models/technology-data>
- [10] KEA Klimaschutz- und Energieagentur Baden-Württemberg GmbH. "Technikkatalog zur Kommunalen Wärmeplanung." Zugriff am: 11. Dezember 2023. [Online] Verfügbar: <https://www.kea-bw.de/waermewende/wissensportal/technikkatalog>

- [11] P. Elsner, M. Fishedick, D. U. Sauer, B. Erlach und B. Lunz, *Flexibilitätskonzepte für die Stromversorgung 2050: Technologien - Szenarien - Systemzusammenhänge* (Schriftenreihe Energiesysteme der Zukunft). München: acatech - Deutsche Akademie der Technikwissenschaften e.V, 2015. Zugriff am: 11. Dezember 2023. [Online] Verfügbar: <https://www.acatech.de/publikation/flexibilitaetskonzepte-fuer-die-stromversorgung-2050-technologien-szenarien-systemzusammenhaenge/>
- [12] P. Viebahn, O. Zelt, M. Fishedick, M. Wietschel, S. Hirzel und J. Horst, *Technologien für die Energiewende: Technologiebericht Band 1* (Wuppertal Report). Wuppertal: Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie, 2018. Zugriff am: 11. Dezember 2023. [Online] Verfügbar: <https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:wup4-opus-70829>
- [13] P. Viebahn, O. Zelt, M. Fishedick, M. Wietschel, S. Hirzel und J. Horst, *Technologien fuer die Energiewende: Technologiebericht Band 2* (Wuppertal Report). Wuppertal: Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie, 2018. Zugriff am: 11. Dezember 2023. [Online] Verfügbar: <https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:wup4-opus-70837>
- [14] D. Stolten *et al.*, *Neue Ziele auf alten Wegen?: Strategien für eine treibhausgasneutrale Energieversorgung bis zum Jahr 2045* (Schriften des Forschungszentrums Jülich: Reihe Energie & Umwelt /Energy & Environment Band 577). Jülich: Forschungszentrum Jülich GmbH, Zentralbibliothek, Verlag, 2022. Zugriff am: 11. Dezember 2023. [Online] Verfügbar: <https://www.fz-juelich.de/de/iek/iek-3/aktuelles/meldungen/neue-ziele-auf-alten-wegen-strategien-fuer-eine-treibhausgasneutrale-energieversorgung-bis-zum-jahr-2045>
- [15] B. Erlach, H.-M. Henning, C. Kost, A. Palzer und C. Stephanos, *Optimierungsmodell REMod-D: Materialien zur Analyse Sektorkopplung - Untersuchungen und Überlegungen zur Entwicklung eines integrierten Energiesystems* (Schriftenreihe Energiesysteme der Zukunft). München: acatech - Deutsche Akademie der Technikwissenschaften; Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina; Union der deutschen Akademien der Wissenschaften, 2018. Zugriff am: 11. Dezember 2023. [Online] Verfügbar: <https://energiesysteme-zukunft.de/publikationen/materialien/optimierungsmodell-remod-d>
- [16] The Danish Energy Agency (DEA). "Memo regarding process and organization of the work with the Danish Technology catalogue." Zugriff am: 11. Dezember 2023. [Online] Verfügbar: https://ens.dk/sites/ens.dk/files/Analyser/metodebeskrivelse_engelsk.pdf
- [17] P. Viebahn *et al.*, *Technologien für die Energiewende: Politikbericht* (Wuppertal Report). Wuppertal: Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie, 2018. Zugriff am: 11. Dezember 2023. [Online] Verfügbar: <https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:wup4-opus-70802>

Auslegung und Einsatz von Großwärmepumpen in verschiedenen multivalenten Wärmeversorgungssystemen basierend auf MILP-Optimierung

Malte Fritz¹, Jonas Freißmann¹, Ilja Tuschy¹

¹Zentrum für Nachhaltige Energiesysteme (ZNES) Flensburg,
Europa-Universität & Hochschule Flensburg, Kanzleistr. 91-93, 24943 Flensburg

Abstract

Um die Transformation hin zu einer klimaneutralen Wärmeversorgung zu gewährleisten, nehmen Großwärmepumpen als hocheffiziente Power-to-Heat-Technologien eine Schlüsselrolle ein. Vor diesem Hintergrund wird eine Methodik zur Bewertung von Großwärmepumpen in multivalenten netzgebundenen Wärmeversorgungssystemen vorgestellt. Diese wird auf drei Fallbeispiele angewendet: erstens ein städtisches Fernwärmenetz, zweitens ein Subnetz, das ein bestehendes Fernwärmenetz erweitert, und schließlich ein kleineres als 4GDH Konzept angelegtes Wärmenetz. Die Methodik erweist sich dabei als vielseitig anwendbar und liefert interpretierbare Ergebnisse. Unter den beispielhaft unterstellten Rahmenbedingungen der historischen Energiesystemdaten von 2019 und einer Förderkulisse mit BEW-Förderung und Wegfall der EEG-Umlage für Power-to-Heat Anlagen werden Großwärmepumpen mit verschiedener Anlagengröße in allen Beispielsystemen integriert. Für eine umfassende Technologiebewertung müssen die Rahmenbedingungen variiert werden.

1. Einleitung

Zu den zentralen Zielen der Energiewende gehört es, die Treibhausgasemissionen zu reduzieren und erneuerbare Energien zu fördern. Dabei liegt ein besonderes Augenmerk auf der Dekarbonisierung des Wärmesektors. Die notwendige Abkehr von fossilen Erzeugungsanlagen verlangt eine Neugestaltung der Wärmeversorgungssysteme [1]. In diesem Kontext ist die Sektorenkopplung von herausragender Bedeutung, insbesondere in immer häufiger auftretenden Zeiten von Überschuss erneuerbarer Energien [2]. Daraus folgend muss in jeder Phase der Wärmewende idealerweise die wirtschaftlich und ökologisch beste Lösung identifiziert werden.

Um den Wärme- und Elektrizitätssektor miteinander zu koppeln, ist die Wärmepumpe als eine vielversprechende Erzeugungstechnologie zu nennen [3, 4]. Dabei ist jedoch anzumerken, dass Großwärmepumpen, wenn sie für die Integration in Wärmenetze in Betracht gezogen werden, in technologischer Hinsicht signifikante Unterschiede gegenüber den für den häuslichen Gebrauch vorgesehenen Anlagen aufweisen. Die wirtschaftliche Attraktivität sowie ihr Beitrag zur Emissionsreduktion sind in hohem Maße von den Gegebenheiten des energiewirtschaftlichen und regulatorischen Umfelds abhängig [5].

Diese Studie stellt eine Methodik zur Bewertung der Integration von Großwärmepumpen in multivalente Wärmeversorgungssysteme vor. Mithilfe der Ergebnisse einer kombinierten Auslegungs- und Einsatzoptimierung wird dabei der Erfolg der Integration hinsichtlich der erzielten Deckungsanteile, der Wärmegestehungskosten und der durch den Betrieb hervorgerufenen Emissionen beurteilt. Um die Nutzbarkeit für verschiedene Fragestellungen zu demonstrieren, wird die Methode beispielhaft auf drei technisch verschiedene Fallbeispiele angewendet. Die zu untersuchenden Wärmeversorgungssysteme reichen dabei von großen Fernwärmenetzen, wie das der Stadt Flensburg, über kleinere Subsysteme mit einem geringeren Wärmebedarf bis hin zu Netzen der vierten Generation der Wärmeversorgung, welche bereits in größerem Umfang in skandinavischen Ländern zu finden sind.

Im Vergleich zu Vorarbeiten [6] stehen nicht die Wärmepumpentechnologien, sondern die technologischen Randbedingungen der Anwendung, wie Temperaturniveaus oder das Zusammenspiel mit anderen Konzepten, im Vordergrund. Die Wärmepumpentechnologie wird dagegen vorab hinsichtlich

technischer Aspekte, wie Kältemittel und Verschaltung, sowie ihrer Wirtschaftlichkeit ausgewählt.

2. Methodik

Zur Bewertung des Potenzials des zu untersuchenden Wärmepumpenkonzepts wird die Perspektive eines Wärmenetzbetreibers eingenommen. Das vorrangige Ziel des Betreibers besteht darin, die Wärmelast aller Verbraucher im Netz zu jedem Zeitpunkt mit minimalen Erzeugungskosten zu decken. In der Regel plant ein Betreiber den Einsatz der verfügbaren Anlagen von Tag zu Tag kontinuierlich auf Grundlage von Day-Ahead-Energiepreisen und Lastprognosen, die ihrerseits beispielsweise auf Wetterdaten basieren (*rolling forecast*).

Bei einer im Vorhinein bekannten Datengrundlage – etwa bei historischen Daten oder feststehenden (Zukunfts-)Szenarien – kann für einen längeren definierten Betrachtungszeitraum eine Auslegungs- und Einsatzoptimierung durchgeführt werden (*perfect forecast*). Das Ergebnis dieser Optimierung repräsentiert den idealen Grenzfall der Einsatzplanung im rolling forecast mit optimalen Prognosen und vorausschauender Einsatzplanung. Somit ermöglicht eine Optimierung in perfect forecast die Beurteilung des maximal auszuschöpfenden Potenzials der zu untersuchenden Erzeugungsanlagen.

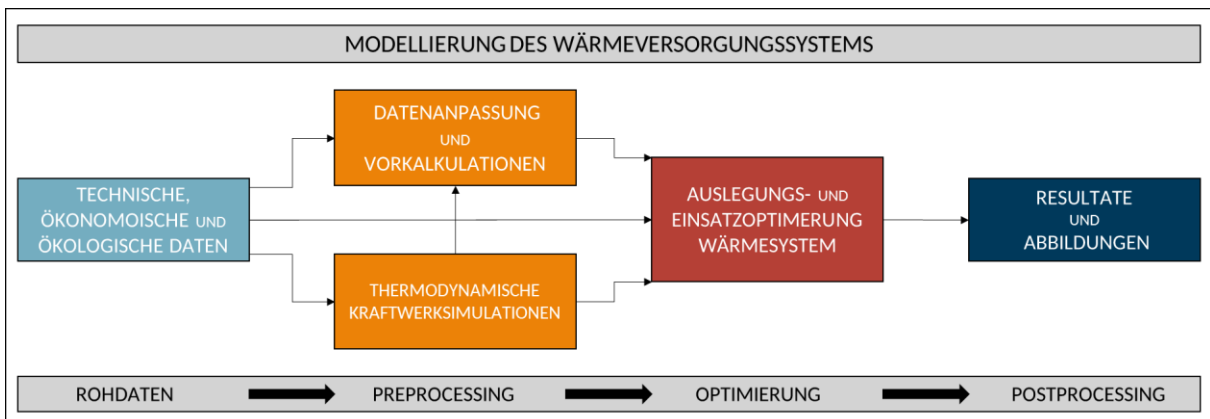


Abb. 1: Ablauf der Auslegungs- und Einsatzoptimierung

Abb. 1 stellt schematisch den hier vorgeschlagenen Workflow für die Durchführung einer Auslegungs- und Einsatzoptimierung dar. Das mathematische Optimierungsverfahren ist in Kapitel 2.1 erläutert. Dabei fließen technische, ökonomische und ökologische Daten teils direkt, teils nach Vorberechnungen als Randbedingungen oder Charakteristiken in das Optimierungsmodell ein. Daraus besonders hervorzuheben ist die thermodynamische Anlagensimulation auf Komponentenebene, welche zur Modellierung des Betriebsverhaltens komplexerer Versorgungsanlagen verwendet und in Abschnitt 2.2 näher erläutert wird. Die Bewertung der Optimierungsergebnisse kann abschließend einerseits in technischer Hinsicht anhand von Einzelanlagengrößen und -einsatz erfolgen, aber zusätzlich auch mithilfe von weiteren Bewertungskriterien, die in Abschnitt 2.3 genauer beschrieben werden.

2.1 Auslegungs- und Einsatzoptimierung

Um eine Wärmelast mit Hilfe verschiedener Versorgungsanlagen zu jeder Zeit aus Sicht eines wirtschaftlich handelnden Akteurs bestmöglich zu decken, können Auslegung und Einsatz der verfügbaren Anlagen hinsichtlich der Kosten und Erlöse optimiert werden. Dafür wird hier das Verfahren der Gemischt Ganzzahligen Linearen Optimierung (MILP, von engl.: *Mixed Integer Linear Programming*) verwendet. Dieses hat sich in vielen Bereichen der Energiesystemmodellierung bewährt und findet folglich breite Anwendung in diesem Forschungsfeld [7]. Beim MILP handelt es sich um die Lösung eines linearen Minimierungsproblems mit Nebenbedingungen. Demzufolge ist eine Zielfunktion zu definieren, deren Ergebnis im Lösungsverfahren minimiert wird. Der Lösungsraum kann über zusätzliche lineare Nebenbedingungen – sogenannte *Constraints* – beschränkt werden.

In der Zielfunktion für die ökonomischen Auslegungs- und Einsatzoptimierung werden im Rahmen dieser Studie die in jedem Zeitschritt t anfallenden Betriebskosten der verschiedenen Anlagen K_a abzüglich möglicher Erlöse E_a sowie die zu Beginn getätigten Investitionskosten aller Anlagen $I_{0,a}$ berücksichtigt, wie Gl. (1) zu entnehmen ist.

$$\min \left[\sum_t \left(\sum_a K_a(t) - E_a(t) \right) + \sum_a I_{0,a} \right] \quad (1)$$

Diese Kosten und Erlöse sind abhängige Variablen des Optimierungsproblems und ergeben sich aus Nebenbedingungen, die in [8] vollständig abgebildet sind. Bei der Auslegungsoptimierung wird die optimale Zusammensetzung der im Wärmeversorgungssystem vorkommenden Versorgungsanlagen ermittelt. Die unabhängigen Variablen im Sinne der Auslegungsoptimierung sind beispielsweise die minimalen und maximalen Kapazitäten der Versorgungsanlagen. Demgegenüber sind die unabhängigen Variablen der Einsatzoptimierung die zur Deckung der Wärmelast nötigen Wärmeströme im Versorgungssystem. Somit werden bei der kombinierten Auslegungs- und Einsatzoptimierung die verfügbaren Wärmeströme aller Versorgungsanlagen durch die Limitierung derer Kapazitäten begrenzt.

Für die Modellierung des Energieversorgungssystems wird das Open-Source-Paket *oemof.solph* aus dem „open energy modelling framework“ (kurz: *oemof*) verwendet [9, 10]. In Abb. 2 ist exemplarisch das Schema eines mit *oemof.solph* konstruierten multivalenten Wärmeversorgungssystems abgebildet.

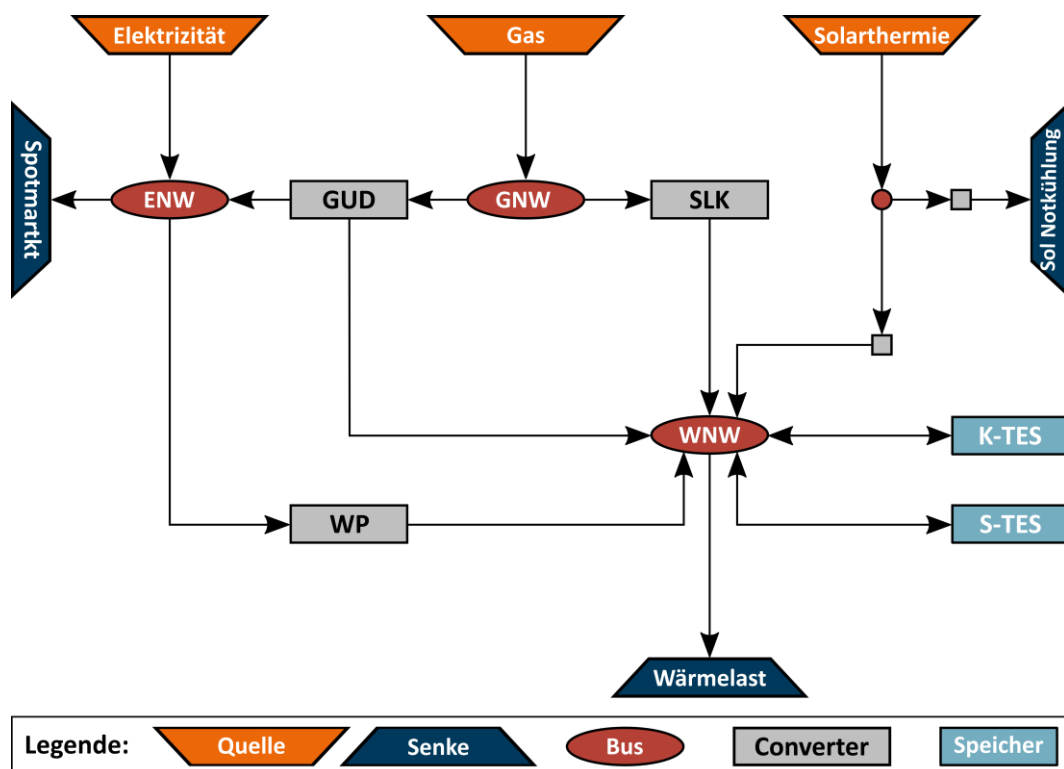


Abb. 2: Schema der Struktur eines exemplarischen Wärmeversorgungssystems in *oemof.solph*

Grundsätzlich tritt Energie über Quellen und Senken (engl.: *Sources & Sinks*) über die Systemgrenzen ein, respektive aus. Diese „fließt“ über Kanten (engl.: *Flows*) zu Knoten wie *Busse* oder sogenannten *Convertern*, in denen der Flow verändert wird. Diese Converter können einfache lineare Converter oder Converter mit einem Offset (gemischtganzzahlige Komponente) sein. Darüber hinaus gibt es auch komplexere Komponenten, wie die *GenericCHP*, welche verschiedene KWK-Technologien abbilden kann sowie *GenericStorage*, mit denen Energiespeicher modelliert werden.

Am konkreten Beispiel bedeutet dies, dass zur Deckung der als Senke modellierten Wärmelast in jedem Zeitschritt verschiedene als (Offset)Converter abgebildete Versorgungsanlagen zur Verfügung stehen. Es ist zu erkennen, dass Wärme konventionell über einen gasbefeuerten Spitzenlastkessel (SLK) oder ein Gas- und Dampfkraftwerk (GuD) bereitgestellt werden kann. Letztere kann zusätzlich elektrische Energie erzeugen, die ihrerseits entweder am Spotmarkt verkauft oder für eine Wärmepumpe (WP) genutzt werden kann. Neben dem Eigenbezug kann die Wärmepumpe aber auch elektrische Energie aus dem Netz beziehen. Außer aus konventionellen Anlagen kann Wärme auch durch Solarthermie gewonnen werden, die aber notfalls an die Umgebung weggekühlt werden kann. Um zusätzlich den Einsatz der Versorgungsanlagen zu flexibilisieren, werden hier ein Kurzzeitspeicher (K-TES) und ein saisonaler Speicher (S-TES), beide als GenericStorage modelliert, eingesetzt. Es wird ersichtlich, dass multivalente Versorgungssysteme durch Kombination verschiedener Versorgungsanlagen eine hohe Flexibilität zur Deckung der Wärmelast aufweisen.

Zur Übersetzung in ein abstraktes mathematisches Modell wird von oemof.solph intern das ebenfalls quelloffene Pythonpaket *Pyomo* genutzt [11]. Nach der mathematischen Formulierung der Lösungsmatrix ist das MILP Problem zu lösen. Die Lösung des Optimierungsproblems erfolgt durch externe Lösungsalgorithmen – sogenannte *Solver* (Open Source: CBC, GLPK; Proprietär: Gurobi). In den nachfolgenden Fallstudien wird der proprietäre Solver Gurobi verwendet, der zumindest mit einer akademischen Lizenz kostenlos zur Verfügung steht.

2.2 Anlagenmodellierung

Die Abbildung des Betriebsverhaltens unterschiedlicher Versorgungsanlagen im Energiesystem erfolgt durch die Anwendung linearer Umwandlungsfaktoren. Bei einfachen Anlagen mit konstantem Betriebsverhalten genügt ein über Zeit und Betriebspunkt konstanter Wandlungsfaktor respektive Wirkungsgrad, wie es typischerweise bei Gaskesseln der Fall ist. Jedoch weisen einige KWK-Technologien mit zwei Freiheitsgraden und Wärmepumpen mit ihrer starken Abhängigkeit von der Wärmequellen- und -senktemperatur unter verschiedenen Randbedingungen und damit innerhalb des Betrachtungszeitraums zu verschiedenen Zeiten unterschiedliche Wandlungsfaktoren auf.

Aufgrund des begrenzten Zugriffs auf reale Anlagenmessdaten und mit Blick auf den Gestaltungsspielraum werden thermodynamische Anlagensimulationen auf Komponentenebene verwendet, um die benötigten Wandlungsfaktoren zu ermitteln. Das Pythonpaket *TESPy* [12], ebenfalls Teil von oemof, ermöglicht das Zusammenschließen und Parametrisieren typischer Komponenten energietechnischer Anlagen sowie deren Auslegungs- und Teillastsimulation. Die Integration der Open-Source-Fluiddatenbank *CoolProp* [13] bietet eine breite Auswahl an Arbeitsmedien.

Für komplexere Versorgungsanlagen werden mit *TESPy* Auslegungen bei Nennkapazität und mittleren Wärmenetztemperaturen durchgeführt. Anschließend erfolgen Teillastsimulationen über das gesamte Spektrum auftretender Netztemperaturen und reduzierter Wärmeabgabe. Die Simulationsergebnisse werden linearisiert und für die Verwendung in der Auslegungs- und Einsatzoptimierung vorbereitet. Das Prinzip des perfect forecast ermöglicht die Vorsortierung temperaturabhängiger Teillastcharakteristiken entsprechend der Wärmequellen- und Netztemperaturzeitreihe. Dadurch ist gewährleistet, dass die Versorgungsanlagen in jedem Zeitschritt ein den vorliegenden Temperaturen zugeordnetes Betriebsverhalten aufweisen.

Die Darstellung der Solarthermie erfordert eine spezielle Vorkalkulation der bereitgestellten Wärme unter Verwendung von Einstrahlungsdaten des Deutschen Wetterdienstes [14]. Diese werden mithilfe des Algorithmus der DIN 5034-2 [15] und Kollektordaten zur Effizienz in solarthermisch bereitgestellte Wärme umgerechnet.

2.3 Bewertungskriterien

Die Kennzahlen und Bewertungsmethoden, welche der Analyse der Ergebnisse zugrunde liegen, sind dieselben, welche in [6] verwendet wurden, und werden folglich an dieser Stelle direkt übernommen. Die bestehende Methodik wird einzig um die Emissionskalkulation Biogas-gefeuerter Anlagen erweitert.

Aufgrund der eingenommenen Perspektive eines Wärmenetzbetreibers sind das zentrale Bewertungskriterium die Wärmegestehungskosten (*LCOH*, von engl.: *Levelized Cost Of Heat*). Sie beschreiben die pro bereitgestellter Wärmemenge über die Lebensdauer n mit einem festgeschriebenen Zinssatz i anfallenden Investitions- und Betriebskosten (I_0 und K_{ges}), abzüglich der möglicherweise anderweitig erzielten Erlöse E_{ges} . Unter der Vereinfachung über der Lebensdauer konstant ablaufender jährlicher Lasterfüllung ergeben sich mit Hilfe des Barwertsummenfaktors *BWSF* (vgl. Gl. (2)) die Wärmegestehungskosten, wie in Gl. (3) beschrieben. [16]

$$LCOH = \frac{I_0 + BWSF \cdot (K_{ges} - E_{ges})}{BWSF \cdot Q_{ges}} \quad (2)$$

$$BWSF = \frac{(1 + i)^n - 1}{(1 + i)^n \cdot i} \quad (3)$$

Neben der ökonomischen Bewertung wird überschlägig die Auswirkung auf das Gesamtenergiesystem Deutschlands anhand einer Emissionskalkulation beurteilt. Diese sieht die Ermittlung aller direkt durch den Betrieb der verschiedenen Anlagen hervorgerufenen Treibhausgasemissionen in jedem Zeitschritt vor. Dazu werden zeitschrittscharfe spezifische Emissionsfaktoren em_{el} der bezogenen elektrischen Energie $W_{el,be}$ sowie ein konstanter spezifischer Emissionsfaktor em_{gas} für das bezogene Gas H_{gas} (Erdgas oder Biogas) herangezogen. Erstere wurden anhand der in [17] dargestellten Methodik aus der stündlichen Stromproduktion der Bundesrepublik des Jahres 2019 [18], analog zum Agorameter [19], berechnet.

Hervorzuheben ist die Emissionskalkulation der KWK-Anlagen: Ihnen wird für die dem Netz der allgemeinen Versorgung zur Verfügung gestellte elektrische Energie $W_{el,prod}$ eine Gutschrift in Höhe der verdrängten Emissionen erteilt. Dabei können einerseits die spezifischen Emissionen des gesamten Strommixes $em_{el,GM}$ oder andererseits ausschließlich diejenigen der fossilen Kraftwerke angesetzt werden. Letzteres beschreibt den Verdrängungsmix $em_{el,VM}$, welcher insbesondere in der Transformationsphase der Energiewende von Bedeutung ist, da eben jene Kraftwerke über die Merit-Order ausgeschlossen und abgeschaltet werden (sollen). Bei der hier verwendeten Methodik zur Bestimmung der Verdrängung anderer Kraftwerke werden jedoch nicht die tatsächlichen regionalen Wechselwirkungen und Einschränkungen aufgrund der vorhandenen Verteilungsnetzinfrastruktur berücksichtigt. Es handelt sich also um eine rein theoretische Bilanzierung mit dem Gesamtsystem. Beide Berechnungsvorschriften werden verwendet, um ein umfangreiches Bild der Systemdienlichkeit zu erhalten. Sie sind jeweils in Gl. (4) für die Emissionen des Gesamtmix $Em_{el,GM}$ und Gl. (5) für die Emissionen des Verdrängungsmix $Em_{el,VM}$ in jeden Zeitschritt festgehalten. [20]

$$Em_{GM}(t) = (H_{gas}(t) \cdot em_{gas} + (W_{el,be}(t) - W_{el,prod}(t)) \cdot em_{el,GM}(t)) \quad (4)$$

$$Em_{VM}(t) = (H_{gas}(t) \cdot em_{gas} + (W_{el,be}(t) - W_{el,prod}(t)) \cdot em_{el,VM}(t)) \quad (5)$$

3. Fallstudien

Ziel der folgenden Fallstudien ist es, die Anwendbarkeit auf unterschiedliche Fragestellungen zur Integration von Großwärmepumpen in die Wärmeversorgung nachzuweisen. Dazu werden in Abschnitt 3.1 Wärmeversorgungssysteme mit verschiedenen Ausgangssituationen konstruiert. Dann werden in Abschnitt 3.2 wirtschaftliche Rahmenbedingungen festgelegt und in Abschnitt 3.3 eine Wärmepumpenauswahl getroffen. Mithilfe der Methodik können dann optimierte Lösungen gefunden werden, die in Abschnitt 3.4 hinsichtlich der wirtschaftlichen Attraktivität sowie ihres Beitrags zur Emissionsreduktion bei den gegebenen energiewirtschaftlichen und regulatorischen Rahmenbedingungen beurteilt werden.

3.1 Wärmeversorgungssysteme

Die primäre Aufgabe beim Betreiben von Wärmeversorgungssystemen, wie Nah- und Fernwärmenetzen, besteht in der Deckung des Wärmebedarfs für den Endverbraucher. Die Gestaltung und Ausrichtung des Versorgungsnetzes wird maßgeblich von der topologischen Beschaffenheit beeinflusst, welche ihrerseits von Faktoren wie der Siedlungsstruktur und den spezifischen Anforderungen der Wärmeabnehmer determiniert wird. Im Folgenden werden drei verschiedene Wärmeversorgungssysteme dargestellt und anschließend analysiert. Diese reichen von einem großen Primärnetz, über ein kleineres Subnetz bis hin zu einem Fernwärmenetz der vierten Generation (4GDH, von engl.: *4th Generation of District Heating*).

Das in Abb. 3 dargestellte Wärmeversorgungssystem beschreibt den Aufbau eines großen Primärnetzes, wie zum Beispiel in Flensburg. Dabei stellt sich das System aus verschiedenen Wärmeversorgungsanlagen zusammen. Neben der zu integrierenden Wärmepumpe kann das System die Technologien der Gas- und Dampfkraftwerke (GuD), Erdgaskessel zur Deckung der Spitzenlast (SLK) sowie eines Pufferspeichers zur kurzfristigen Speicherung (K-TES) von Wärme enthalten. Dieses Beispiel steht für die Neugestaltung der Erzeugungsanlagen eines bestehenden Netzes mit hohen Vorlauftemperaturen, wobei der Rückgriff auf konventionelle Versorgungstechnologien erlaubt ist.

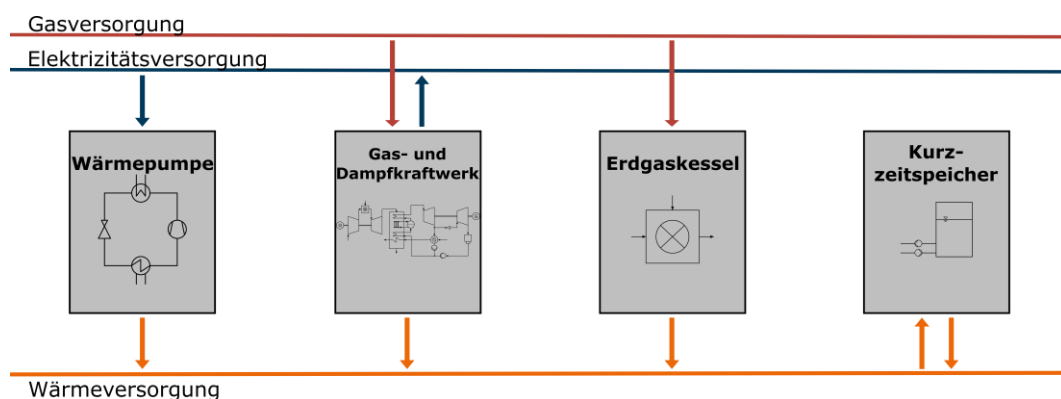


Abb. 3: Topologie des Primärnetzes

Gegenüber großen Primärnetzen wird in der Wärmeversorgung ein Subnetz als separiertes und zumeist als gekoppelt kleines Teilnetz beschrieben. Deswegen weisen diese einen deutlich geringeren Wärmebedarf und aufgrund von neueren Netzstrukturen oft höhere Effizienzen und geringere Netztemperaturen auf. Neben den zu integrierenden Wärmepumpen kann das hier im zweiten Beispiel behandelte Subnetz Wärme aus einem dazugehörigen Primärnetz (PN) beziehen. Dessen Auslegung wurde im Vorhinein ohne Wärmepumpentechnologie optimiert. Bei dem Wärmebezug vom Primär- ins Subnetz wird ein Netzwärmeverlust von 20 % unterstellt. Zusätzlich ist ein Pufferspeicher in das in Abb. 4 abgebildete Versorgungssystem integriert. Da Wärmeversorger oftmals vor der Frage stehen, ob bei einem neu zu erschließenden Subnetz eine Versorgungsanlage direkt am Subnetz zu bauen oder das

vorhanden Primärnetz zu erweitern ist, wird in der Analyse des Subnetzes beide Möglichkeiten zur Integration der Wärmepumpe gegeben.

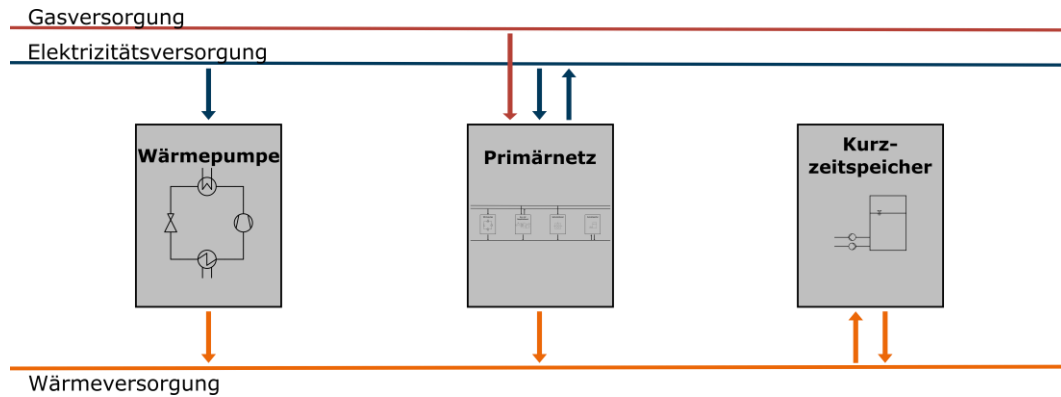


Abb. 4: Topologie des Subnetzes

Als fortschrittliche Wärmeversorgungssysteme werden Fernwärmenetze der vierten Generation (4GDH) beschrieben. Diese sind zu weiten Teilen in skandinavischen Ländern verbreitet und zielen darauf ab, die Effizienz mithilfe verringerter Netztemperaturen, Nachhaltigkeit und Integration erneuerbarer Energiequellen in die Wärmeversorgung zu maximieren [21]. Um im dritten Fallbeispiel die Integration von Wärmepumpen in Systeme der 4GDH zu untersuchen, wird gemäß Abb. 5 ein Wärmeversorgungssystem entworfen, in dem diese Technologie im Zusammenspiel mit einem Biogas-Blockheizkraftwerks (BHKW) sowie Solarthermie und einem saisonalen Wärmespeicher (S-TES) eingesetzt wird. Somit beschreibt diese Versorgungsstruktur gegenüber den anderen Versorgungsnetzen einen moderneren Ansatz, bei dem ein hoher Anteil an erneuerbaren Energien erzielt werden kann. Wie im ersten Beispiel soll in diesem Versorgungssystem eine vollständige Neugestaltung des Wärmeerzeugungssystems untersucht werden. Der Unterschied äußert sich aber in geringeren Wärmelasten, niedrigeren Netztemperaturen und einer anderen Erzeugungsstruktur.

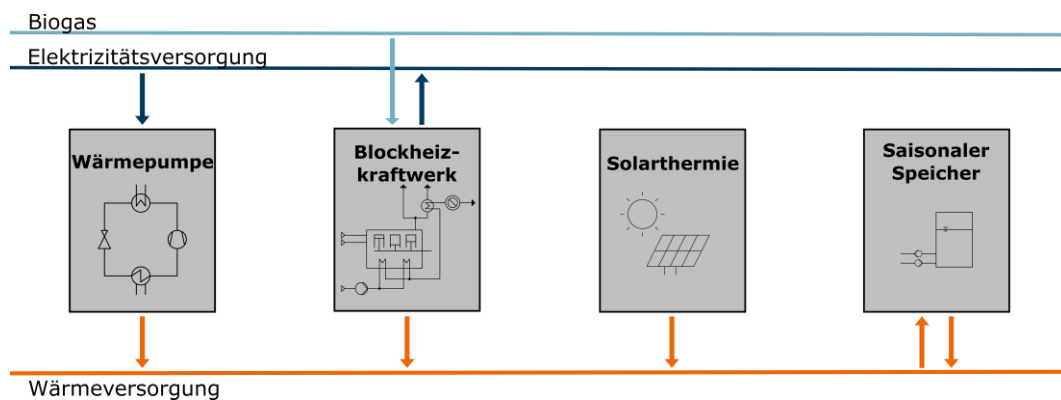


Abb. 5: Topologie des Fernwärmenetzes der vierten Generation (4GDH)

Neben der Zusammenstellung der Versorgungsanlagen unterscheiden sich die Wärmesysteme auch in den zu deckenden Wärmelasten sowie den im System vorherrschenden Vor- und Rücklauftemperaturen. In Abb. 6 sind die Wärmelastdaten der Stadt Flensburg und die der dänischen Stadt Sønderborg des Jahres 2019 in stündlicher Auflösung dargestellt. Die dazu gehörigen Mittelwerte der Vor- und Rücklauftemperaturen sind in Tab. 2 in Abschnitt 3.3 zu finden. Da die stündlichen Werte der Vorlauftemperaturen stark mit denen der Wärmelast korrelieren, wird an dieser Stelle auf eine Abbildung verzichtet. Bei Bedarf sind diese in [22] abzulesen.

Die Last- und Temperaturdaten von Flensburg dienen als Basis für das Primärnetz und werden darüber hinaus auf 10% der vorhandenen Lasten skaliert, um den Bedarf des kleineren Subnetzes abzubilden. Aufgrund moderater Netztemperaturen eignen sich für das 4GDH Netz die Daten aus Sønderborg.

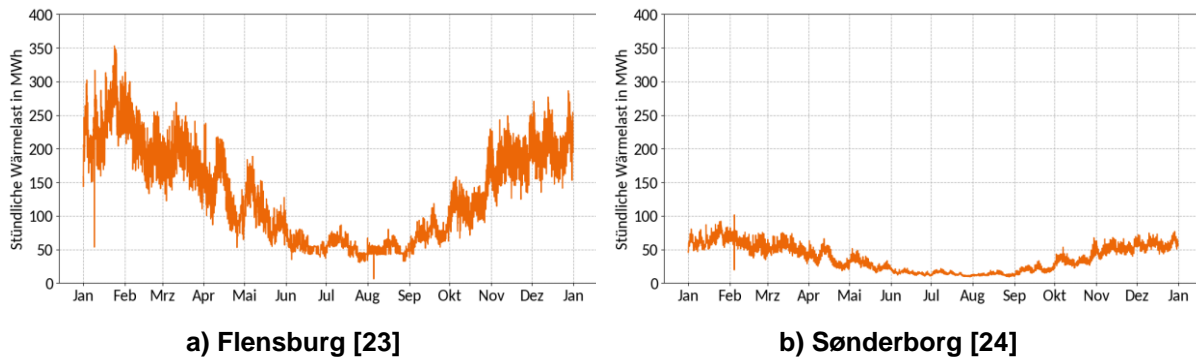


Abb. 6: Vergleich der Zeitreihen der stündlichen Wärmelasten aus dem Jahr 2019

Als technische Limitierung bei der Auslegung der Wärmepumpen ist zu beachten, dass aufgrund der Marktverfügbarkeit eine maximale thermische Kapazität von 50 MW angenommen wird. Um auch den theoretischen Deckungsanteil von 100 % im Primärnetz zu ermöglichen, wird es in der Auslegungs- und Einsatzoptimierung erlaubt, bis zu 7 Wärmepumpen zu installieren. Für die Kontinuität der Betrachtung wird dieser Freiheitsgrad für alle zu untersuchenden Wärmeversorgungssysteme angenommen. Die maximalen Be- und Endladeleistungen aller Speicher sind auf die im Versorgungssystem vorherrschende Engpassleistung begrenzt. Außerdem wird angenommen, dass die maximal zu installierende Kapazität des K-TES auf 24 Stunden dieser Leistung beschränkt ist. Ebenfalls auf die Engpassleistung sind die maximalen Kapazitäten der gasbefeuerten Versorgungsanlagen limitiert. Demgegenüber unterliegen die maximalen Kapazitäten der Solarthermie und die des S-TES keiner Begrenzung.

3.2 Wirtschaftliche Rahmenbedingungen

Als energiepolitische und -wirtschaftliche Grundlage dienen die Rahmenbedingungen des Jahres 2019. Dieses Jahr markiert den letzten Zeitpunkt vor dem Einsetzen der Corona-Pandemie und die durch den russisch-ukrainischen Krieg hervorgerufene Energiekrise. Bis dahin stellte die Integration von Wärmepumpen in bestehende Versorgungssysteme eine Herausforderung dar, welches in [25] demonstriert wurde. Im Jahr 2023 veränderten sich jedoch die regulatorischen Rahmenbedingungen signifikant zugunsten der Wärmepumpentechnologie. Zentrale Mechanismen sind insbesondere der Wegfall der Umlage für den Ausbau erneuerbarer Energien (EEG-Umlage) und die Einführung der Bundesförderung für effiziente Wärmenetze (BEW). Die Aufnahme dieser regulatorischen Maßnahmen in die wirtschaftlichen Rahmenbedingungen ermöglicht eine Untersuchung ohne Einflüsse der genannten Krisen unter Berücksichtigung aktueller politischer Rahmenbedingungen.

Somit ergeben sich, ausgehend von den Spotmarktdaten, neue Preise für den Bezug und die Bereitstellung von elektrischer Energie. Beim Netzbezug betragen die zusätzlichen Kosten 52,50 €/MWh und bei Eigennutzung fallen zusätzliche Kosten von 20,50 €/MWh an. Die für diese Fallstudien relevanten Rahmenparameter des Jahres 2019 sind, mit Hinweis auf ihre jeweiligen Auflösung, in Tab. 1 zusammengefasst, wobei es sich um energiewirtschaftliche Informationen des deutschen Energiesystems handelt. Außerdem werden die Fördermechanismen für KWK-Anlagen berücksichtigt.

Tab. 1: Verwendete Rahmenparameter des Jahres 2019 mit Angabe der jeweiligen Auflösung

Parameter	Wert	Einheit	Auflösung	Quelle
Fernwärmeerlös	76,34	€/MWh	konst.	[26]
Mittlerer Strommarktpreis	37,67	€/MWh	1h	[18]
Mittlerer Erdgaspreis	15,71	€/MWh	1m	[27]
Mittlerer Biogaspreis	84,07	€/MWh	konst.	[28, 29]
Mittlerer CO2-Preis	24,68	€/t	1m	[30]
Energiesteuer	5,50	€/MWh	konst.	[31]
Mittlere elektrische Emissionsfaktoren (GM)	0,412	t/MWh	1h	[18, 17]
Mittlere elektrische Emissionsfaktoren (VM)	0,679	t/MWh	1h	[18, 17]
Emissionsfaktor Erdgas	0,2012	t/MWh	konst.	[32]
Emissionsfaktor Biogas	0,152	t/MWh	konst.	[33]

Im Rahmen der BEW-Förderung werden in der vorliegenden Fallstudie ausschließlich die für den spezifischen Anwendungsfall relevanten Mechanismen betrachtet. Die maximale Förderhöhe für ein Wärmeversorgungssystem beläuft sich auf 100 Mio. €, wobei die individuelle Förderquote der Versorgungsanlagen auf 40% der anfallenden Investitionskosten begrenzt ist. Zusätzliche Voraussetzungen sind in den jeweiligen Modulen der BEW-Förderung detailliert festgelegt [34, 35].

Neben der Investitionskostenförderung wird auch eine Unterstützung der Betriebskosten gewährt. Solarthermieranlagen erhalten eine Förderung von 10 €/MWh oder maximal 90% der anfallenden Betriebskosten. Demgegenüber sind netzbetriebene Wärmepumpen förderfähig, sofern sie eine Jahresarbeitszahl (SCOP, von engl.: *Seasonal Coefficient Of Performance*) von mindestens 2,5 aufweisen. Die Förderung für diese Wärmepumpen wird gemäß Gl. (6) berechnet, wobei eine Begrenzung der Betriebskostenförderung auf 92 €/MWh für bezogene Umgebungswärme gilt.

$$E_{BEW,wp,netz} \left[5,5 - \left(6,8 - \frac{17}{SCOP} \right) \cdot 0,75 \right] \cdot \left(\frac{SCOP}{SCOP - 1} \right) \quad (6)$$

Die Betriebskostenförderung ist zudem auf 90% der nachgewiesenen Stromkosten begrenzt. Nicht näher erläutert wird an dieser Stelle der Bezug aus erneuerbaren Energien. [36]

3.3 Vorauswahl der Wärmepumpen

Die Integration von Wärmepumpen in multivalente Systeme stellt eine komplexe Herausforderung dar, die von einer Vielzahl von Einflussgrößen abhängig ist. Vorab sind verschiedene in der Literatur vorkommende Topologien nach [5, 37] untersucht worden. Als Ausgangspunkt der Untersuchung diente die Topologie des einfachen Wärmepumpenkreislaufs. Darüber hinaus wurden Schaltungen mit Zwischenkühler, interner Wärmeübertragung, Economizer, paralleler Kompression, Schaltungen mit einem Flashtank sowie kaskadierte Schaltungen und verschiedene Kombinationen daraus analysiert. Da ebenso die Wahl des Kältemittels eine kritische Rolle spielt, wurden verschiedene Kältemittel nach [5] in die Analyse einbezogen. Durch Limitation wegen hoher Belastung der Umwelt, geringen kritischer Temperatur und mangelnder Verfügbarkeit in der Open Source Fluiddatenbank CoolProp sind die

subkritischen Kältemittel R717, R1234ZE(Z), R1234ZE(E), R1234YF und R1233ZD(E) für alle Kreise sowie R718 für kaskadierte und R744 für transkritische Wärmepumpenkreise untersucht worden. Insgesamt wurden 94 verschiedene Setups für jedes Wärmeversorgungssystem untersucht.

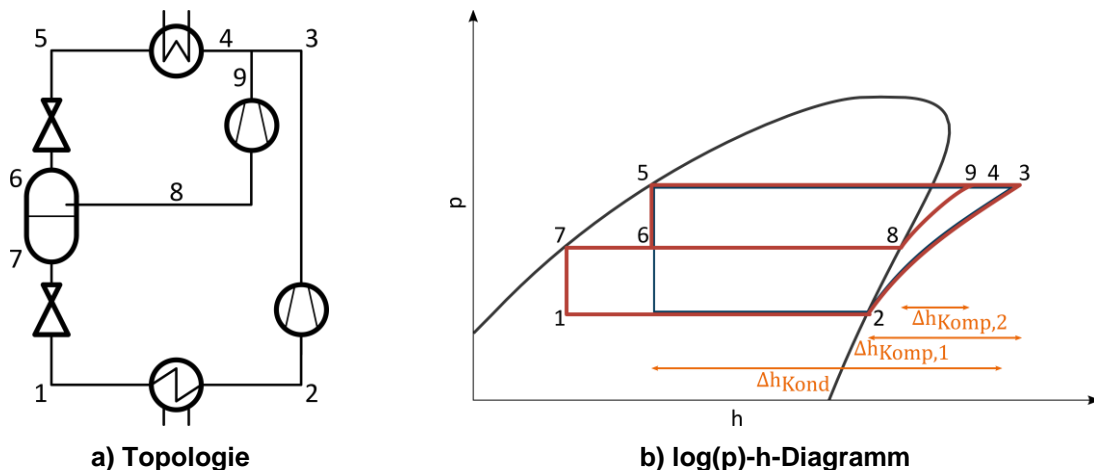
Als Wärmequelle dient Wasser aus einer Umweltquelle (z.B. Wasser aus Flüssen oder Meeresbuchten) aufgrund der freien Verfügbarkeit, hohen Energiedichte und gegenüber Luft geringeren Temperaturschwankung. Dafür werden Daten der Flensburger Förde aus dem Jahr 2019 verwendet [38]. In Tab. 2 sind die für die Auslegung der Wärmepumpen relevanten mittleren Vor- und Rücklauftemperaturen der Wärmepumpenquelle und -senke zusammengefasst.

Tab. 2: Auslegungsparameter der mittleren Quell- und Senkentemperaturen für die Vorauswahl

Netzparameter	Primärnetz	Subnetz	4GDH
Mittlere Vorlauftemperatur Wärmequelle		- 10 °C -	
Mittlere Rücklauftemperatur Wärmequelle		- 5 °C -	
Mittlere Vorlauftemperatur Wärmesenke	90 °C	82 °C	75 °C
Mittlere Rücklauftemperatur Wärmesenke	50 °C	50 °C	40 °C

Neben den technischen Parametern wurden ebenso verschiedene Kostenfunktionen der einzelnen Wärmepumpenkomponenten in die Analyse einbezogen, aus denen sich die spezifischen Investitionskosten des jeweiligen Setups berechnen lassen. Diese können in [39, 40, 41] nachgelesen werden.

Aus der umfangreichen Vorauswahl der Wärmepumpensetups ist aufgrund eines ausgewogenen Kompromisses zwischen Investitionskosten und COP ad hoc das Setup der parallelen Kompression mit offenem Economizer bei Verwendung des Kältemittels R717 ausgewählt worden. In Abb. 7a ist dessen topologischer Aufbau und in Abb. 7b der entsprechende Prozessverlauf qualitativ im log(p)-h-Diagramm (rot) im Vergleich zum einfachen Wärmepumpenkreislauf (blau) abgebildet.



a) Topologie
b) log(p)-h-Diagramm
Abb. 7: Wärmepumpe mit paralleler Kompression mit offenem Economizer (rechts in rot, vergleichend in blau einfacher Wärmepumpenkreislauf)

Die Parametrisierung der thermodynamischen Anlagensimulation dieses Wärmepumpensetup ist im Anhang in Tab. 9 zu finden. Die aus der Vorauswahl resultierenden COP im Nennpunkt sowie die linearisierten spezifischen Investitionskosten sind für alle Versorgungssysteme in Tab. 3 zusammengefasst. Es ist zu erkennen das der COP im Nennpunkt vom Primärnetz bis hin zum 4GDH Netz stetig

steigt. Dieses ist auf die veränderten Senktemperaturen der Versorgungssysteme zurückzuführen. Bei den spezifischen Investitionskosten ist ein leicht gegenläufiger Trend zu erkennen.

Tab. 3: Übersicht des COP im Nennpunkt und spez. Investitionskosten der ad hoc ausgewählten Wärmepumpen bei den verschiedenen Wärmeversorgungssystemen

Versorgungssystem	COP im Nennpunkt	Spezifische Investitionskosten
Primärnetz	2,70	259.518,54 €/MW + 1.421.408,49 €
Subnetz	2,93	268.976,23 €/MW + 1.465.475,88 €
4GDH	3,16	271.515,04 €/MW + 1.478.283,00 €

Wie in Kapitel 2.2 beschrieben, müssen nach der Auslegung der Wärmepumpe jeweils Teillast-simulationen über das gesamte Spektrum auftretender Quell- und Netztemperaturen sowie für schrittweise reduzierte Wärmeabgabe durchgeführt werden. Die Simulationsergebnisse werden anschließend linearisiert und für die Verwendung in der Auslegungs- und Einsatzoptimierung vorbereitet.

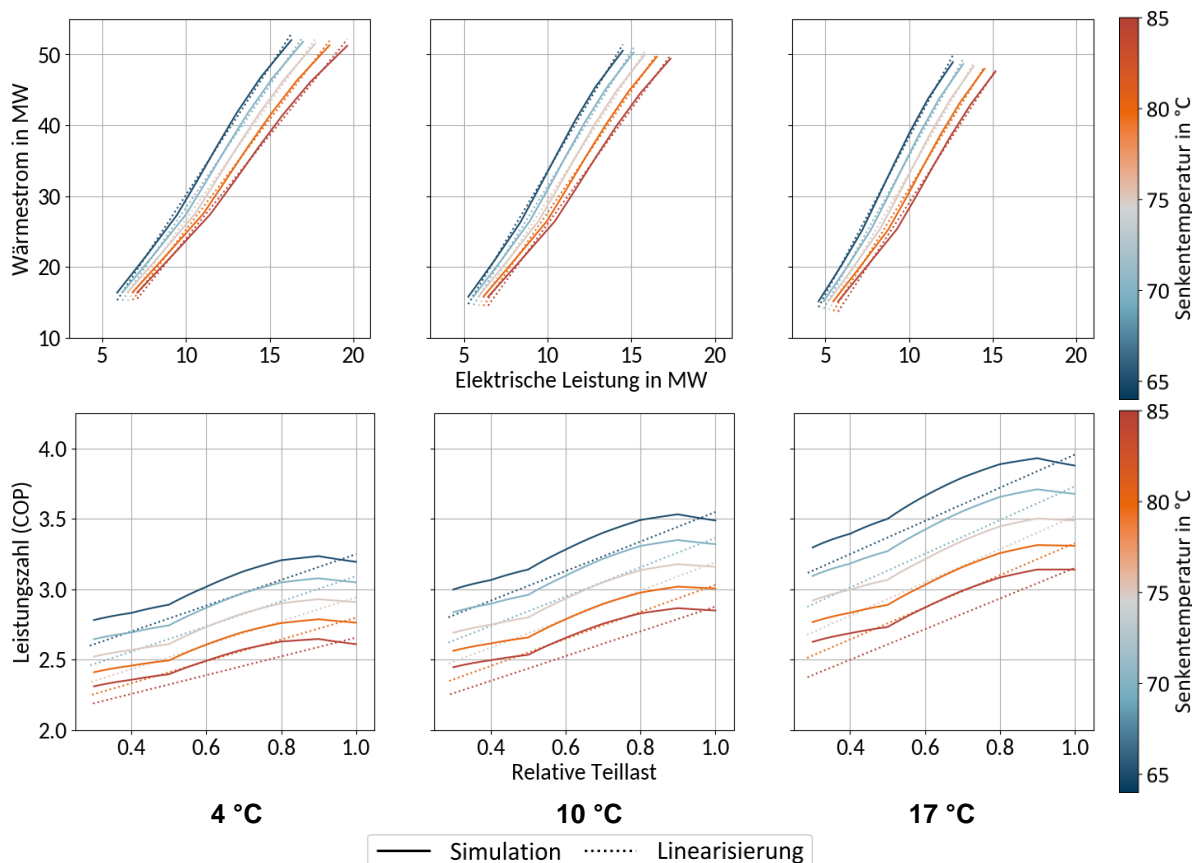


Abb. 8: Linearisierte Charakteristiken im \dot{Q} -P-Diagramm und im COP-Teillast-Diagramm für drei verschiedene Quelltemperaturen über das Spektrum der Netztemperatur für das 4GDH Netz

In Abbildung 8 sind linearisierte Charakteristiken im \dot{Q} -P-Diagramm sowie im COP-Teillast-Diagramm für drei verschiedene Quelltemperaturen (4 °C, 10 °C und 17 °C) über das gesamte Spektrum der Netztemperatur für das 4GDH Netz exemplarisch dargestellt. Zur Linearisierung der Simulationsergebnisse wurde die Methode kleinster Quadrate der Python-Bibliothek *numpy* verwendet [42], welche den tatsächlichen Verlauf im \dot{Q} -P-Diagramm gut annähert. Im COP-Teillast-Diagramm wird jedoch deutlich,

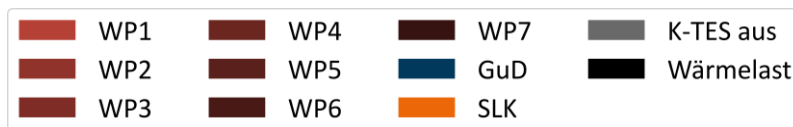
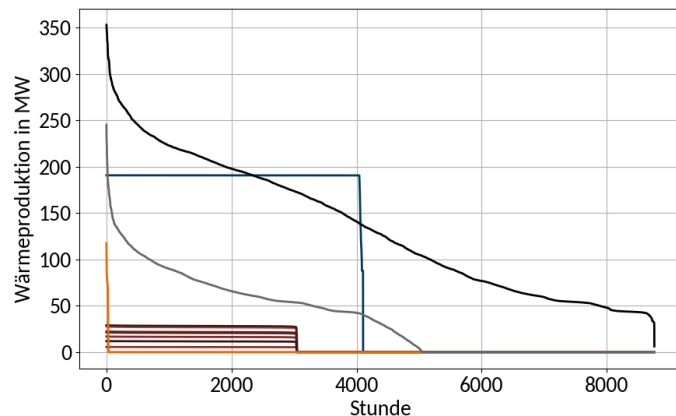
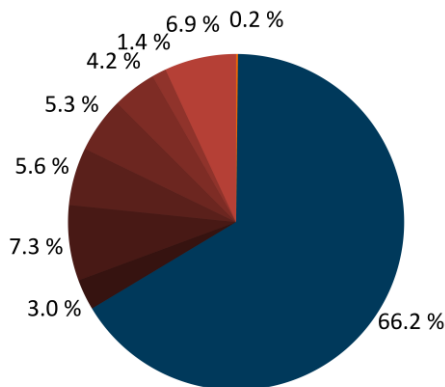
dass die Linearisierung eine Überschätzung der Leistungszahl im Nennpunkt sowie den gegenläufigen Effekt in der Teillast nach sich zieht.

3.4 Ergebnisse

Die Ergebnisse der optimierten Auslegung von Großwärmepumpen in einem größeren städtischen Wärmeversorgungssystem sind in Tab. 4 zu finden. In diesem Fallbeispiel erweist sich die KWK-Anlage mit einer installierten Leistung von etwa 190 MW als die dominierende Erzeugungseinheit für die Wärmebereitstellung. Die Heizleistung der GuD-Anlage liegt damit bei etwas mehr als der Hälfte der Spitzennachfrage im Wärmenetz. Die Wärmepumpen liegen in Summe bei einer installierten Leistung von ca. 128 MW, wobei die größte der Wärmepumpen eine Heizleistung von 27,7 MW, die kleinste eine Kapazität von 5,2 MW aufweist. Die installierte Leistung des Spitzenlastkessels liegt bei 118 MW. Der Wärmespeicher ist mit der maximalen Kapazität in der Lage, eine Energie von fast 8,5 GWh aufzunehmen, was knapp zwei Tagen Volllast der KWK-Anlage entspricht. Es werden alle sieben möglichen Wärmepumpen mit unterschiedlicher Leistung installiert, wobei keine die maximal angebotene Kapazität von 50 MW annähernd ausschöpft.

Tab. 4: Die aus der Auslegungsoptimierung resultierenden Kapazitäten des Primärnetzes

GuD	WP1	WP2	WP3	WP4	WP5	WP6	WP7	SLK	K-TES
190,6 MW	26,3 MW	5,2 MW	16,0 MW	20,2 MW	21,2 MW	27,7 MW	11,3 MW	118,0 MW	8472 MWh



a) Deckungsanteile

b) Jahresdauerlinien

Abb. 9: Deckungsanteile und Jahresdauerlinien des Primärnetzes

Die GuD-Anlage ist mit etwa zwei Dritteln der bereitgestellten Wärme auch die Einheit mit dem größten Deckungsanteil, während sich das restliche Drittel dem Leistungsanteil entsprechend auf die Wärmepumpen verteilt. Wie in Abb. 9 zu sehen ist, wird der Spitzenlastkessel fast überhaupt nicht eingesetzt. Anders verhält es sich bei den Wärmepumpen und der KWK-Anlage. Diese werden überwiegend in Volllast betrieben. Der Speichereinsatz variiert dagegen über die Zeit stark. Sowohl was Leistung als auch was umgesetzte Energie betrifft, stellt er einen wichtigen Baustein der Wärmebereitstellung dar.

Abb. 10 verdeutlicht, dass der Kurzzeitspeicher genutzt wird, um den Teillastbetrieb der übrigen Erzeugungsanlagen zu vermeiden beziehungsweise um trotz Minimallastbeschränkung die bevorzugte

Erzeugungseinheit einzusetzen. In den Sommermonaten ist deutlich zu erkennen, dass die KWK-Anlage priorisiert zur Deckung des Bedarfs eingesetzt wird. Die im Rahmen der Studie besonders im Fokus stehenden Wärmepumpen kommen dagegen überwiegend im Winter und zum geringeren Teil in der Übergangszeit zum Einsatz, das heißt insbesondere bei hoher Wärmenachfrage. Im Vergleich der Monate Februar und März zeigt sich ein ähnlicher Anlageneinsatz bei ähnlicher Wärmenachfrage. Deutlichere Unterschiede ergeben sich im Vergleich der Monate April und Oktober. Insbesondere in der Gegenüberstellung von November zu Dezember wird deutlich, dass neben dem Wärmebedarf auch andere Faktoren für den Anlageneinsatz eine Rolle spielen. Während der Bedarf im November noch stärker von der GuD-Anlage gedeckt wird, ist der Anteil der Wärmepumpen im Dezember trotz der saisonal ungünstigeren Temperaturen größer, was auf den Einfluss energiewirtschaftlicher Rahmenbedingungen zurückzuführen ist.

Zusammenfassend lässt sich für das städtische System festhalten, dass die Großwärmepumpen darin eine gewichtige Rolle übernehmen, obwohl die KWK-Anlage unter den hier unterstellten Rahmenbedingungen die dominante Technologie bleibt. Die Wärmepumpen werden hier bevorzugt im Winterhalbjahr eingesetzt und erreichen Volllaststunden in der Größenordnung von 3000 h/a. Der Teillastbetrieb der Wärmepumpen wird mit Hilfe des thermischen Speichers vermieden

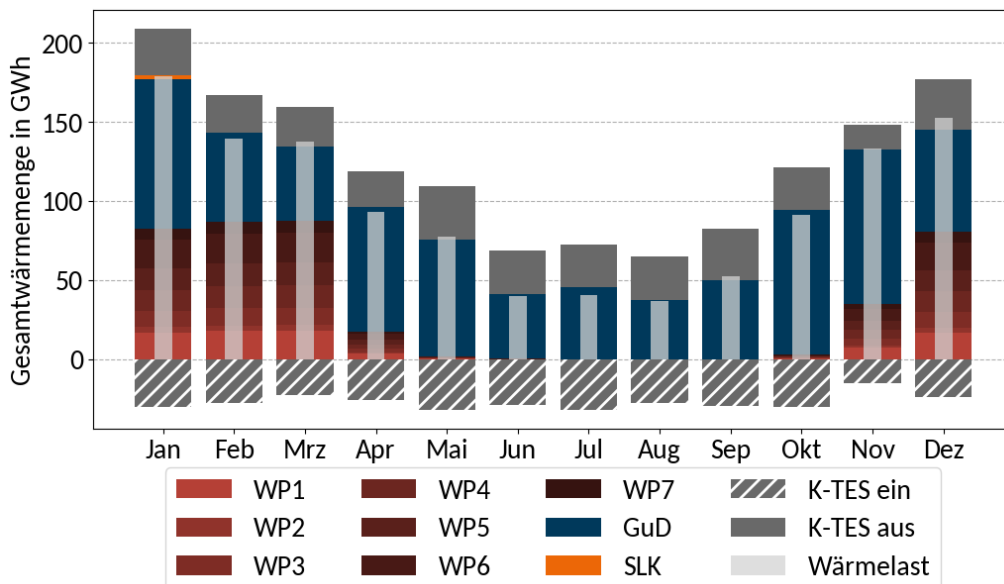


Abb. 10: Monatliche Gesamtwärmemenge nach Versorgungsanlage für das Primärnetz

Im Fall des Subnetzes innerhalb einer städtischen Großstruktur ergibt sich ein etwas anderes Bild. Wie Tab. 5 zu entnehmen ist, werden nur zwei von sieben möglichen Wärmepumpen installiert, die sich in der absoluten installierten Leistung mit 6,7 MW und 12,0 MW voneinander unterscheiden und insgesamt mit 18,7 MW ungefähr die Hälfte der maximalen Wärmelast ausmachen, auch wenn sie weit von der oberen Leistungsgrenze entfernt sind. Die Rolle der KWK-Anlage im ersten Fallbeispiel übernimmt hier das als Absicherung vorgesehene Primärnetz. Der im Subnetz installierte Speicher fällt in der Relation zum ersten Fallbeispiel gleich aus und wird somit ebenfalls voll ausgebaut

Tab. 5: Die aus der Auslegungsoptimierung resultierenden Kapazitäten des Subnetzes

Sub WP1	Sub WP2	Sub WP3	Sub WP4	Sub WP5	Sub WP6	Sub WP7	Sub K-TES
6,7 MW	12,0 MW	-	-	-	-	-	846,8 MWh

Abb. 11 verdeutlicht, dass der im Subnetz installierte Speicher nur wenig genutzt wird. Die Wärmepumpen werden auch hier bevorzugt in Volllast betrieben, aber die Lastanpassung in erster Linie durch den Bezug aus dem Primärnetz umgesetzt. In der Spitze wird aus dem Primärnetz sogar mehr als die maximale Wärmelast abgerufen. Der Speicher im Subnetz wird also auch als erweiterte Speicherkapazität des Primärnetzes genutzt.

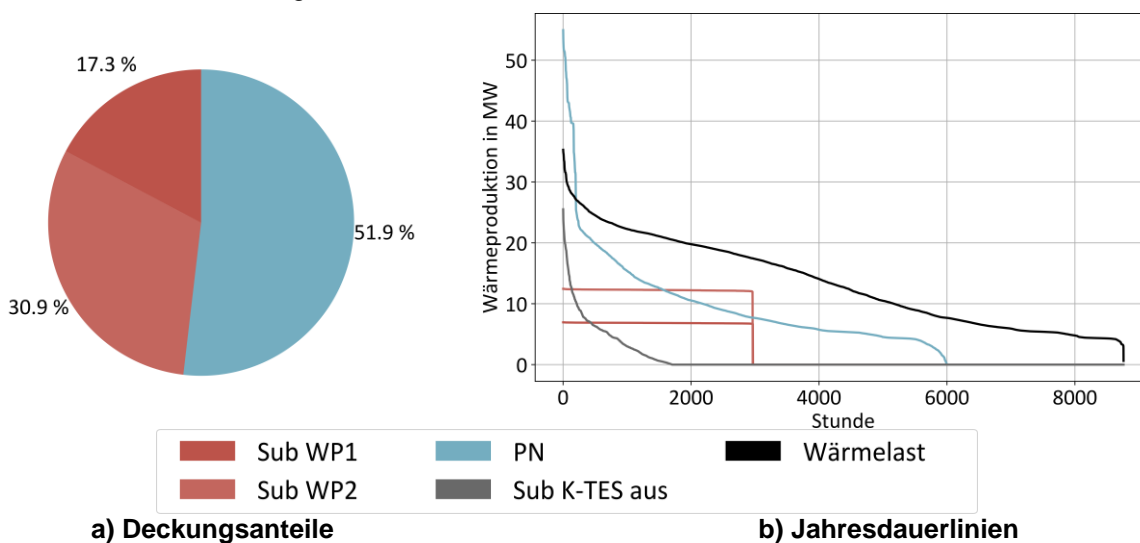


Abb. 11: Deckungsanteile und Jahresdauerlinien des Subnetzes

Dementsprechend hoch ist auch der Deckungsanteil des Primärnetzes im Subnetz. In Abb. 11 ist zu erkennen, dass Primärnetz und Wärmepumpen über den gesamten Betrachtungszeitraum je etwa zur Hälfte den Bedarf des Subnetzes decken.

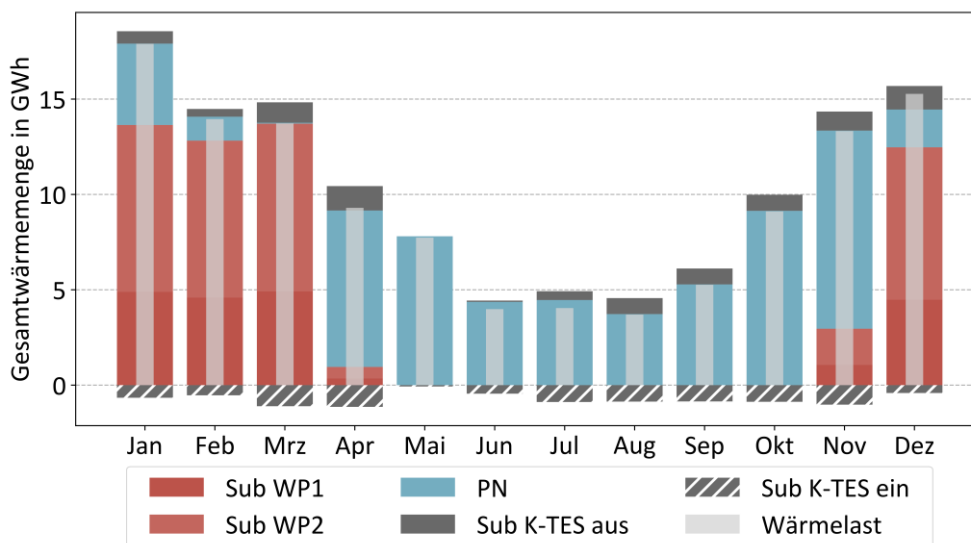


Abb. 12: Monatliche Gesamtwärmemenge nach Versorgungsanlage für das Subnetz

Wie aus Abb. 12 hervorgeht, findet der Einsatz der Wärmepumpen hierbei wiederum vor allem im Winterhalbjahr statt. Im Vergleich der Monate März und November zeigt sich aber, dass der Einsatz der Anlagen sich insbesondere in der Übergangszeit stark unterscheiden kann. Die erreichten Volllaststunden der Wärmepumpen liegen wiederum in der Größenordnung von 3000 h/a.

Was das Fallbeispiel des Subnetzes betrifft, sollte auch das dazu gehörige Hauptnetz, das zuvor ohne Wärmepumpen ausgelegt worden ist, noch einmal in den Blick genommen werden. Dieses ist in diesem Fall noch sehr viel stärker als im ersten Fallbeispiel von der KWK-Anlage geprägt, deren installierte Leistung deutlich über 80 % der maximalen Wärmelast im Primärnetz ausmacht, wie sich Tab. 6 entnehmen lässt. Auch unter Hinzunahme des Exports in das im Fokus stehende Subnetz beträgt der Leistungsanteil noch drei Viertel. Der Spitzenlastkessel weist dabei eine ebenfalls deutlich größere Leistung auf. Dennoch werden auch nachträglich im Primärnetz drei Wärmepumpen installiert, die hier aber mit 50 MW, 24,2 MW und 12,0 MW wiederum gestufte, aber deutlich größere Leistungen aufweisen und erstmals auch die maximal mögliche Leistung zeigen. Der Speicher im Primärnetz entspricht dabei dem ersten Fallbeispiel.

Tab. 6: Die aus der Auslegungsoptimierung resultierenden Kapazitäten des vorhandenen Primärnetzes im Subnetz

GuD*	WP1	WP2	WP3	WP4	WP5	WP6	WP7	SLK*	K-TES*
296,5 MW	50,0 MW	24,2 MW	12,0 MW	-	-	-	-	247,0 MW	8472 MWh

* Die Kapazitäten des GuD, SLK und K-TES wurden separat ohne Wärmepumpen ausgelegt.

Abb. 13 zeigt, dass auch in diesem Fall KWK-Anlagen wie Wärmepumpen fast ausschließlich in Volllast betrieben werden. Der Deckungsanteil des GuD-Heizkraftwerks fällt hier noch höher als in ersten Fallbeispiel aus. Aufgrund der höheren installierten Einzelleistungen kommt es bei allen Erzeugungsanlagen zu merklich verringerten Volllaststunden.

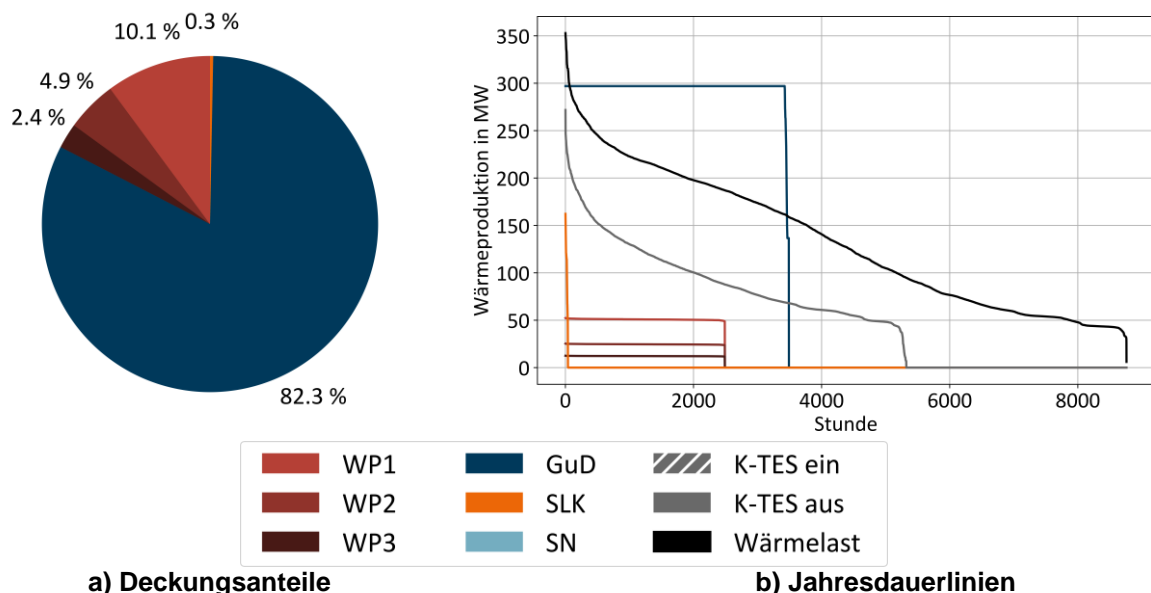


Abb. 13: Deckungsanteile und Jahresdauerlinien des vorhandenen Primärnetzes im Subnetz

Dies könnte ein Grund dafür sein, dass hier die Größendegression bei den Investitionskosten der Wärmepumpen stärker greift und so größere Einzelanlagen installiert werden. Die Lastanpassung übernimmt hier wieder der Speicher des Primärnetzes, was die Aussagen zum Speicher im Subnetz in

gewisser Weise relativiert. Aufgrund der größeren Leistung der Einzelanlagen wird der Speicher insgesamt intensiver genutzt, wie auch Abb. 14 zu entnehmen ist. Insbesondere ist dort auch zu erkennen, dass der Export ins Subnetz schwerpunktmäßig stattfindet, wenn die KWK-Anlage – gegebenenfalls in Kombination mit dem Speicher – in Betrieb ist. Auch im Hauptnetz werden die Wärmepumpen im zweiten Fallbeispiel in den Wintermonaten eingesetzt.

Zusammenfassend ist für das zweite Fallbeispiel festzuhalten, dass die Großwärmepumpen mit Blick auf ihren Anteil an der Lastdeckung hier bevorzugt, aber nicht ausschließlich im durch die günstigeren Temperaturverhältnisse geprägten Subnetz installiert werden. Was die absolute installierte Leistung der Wärmepumpen betrifft, sind die Wärmepumpen im Primärnetz sogar erheblich größer. Die KWK-Anlage bleibt aber auch hier die dominierende Erzeugungstechnologie und arbeitet ganzjährig intensiv mit dem Kurzzeitspeicher zusammen, um – wie alle Anlagen – den Teillastbetrieb zu vermeiden.

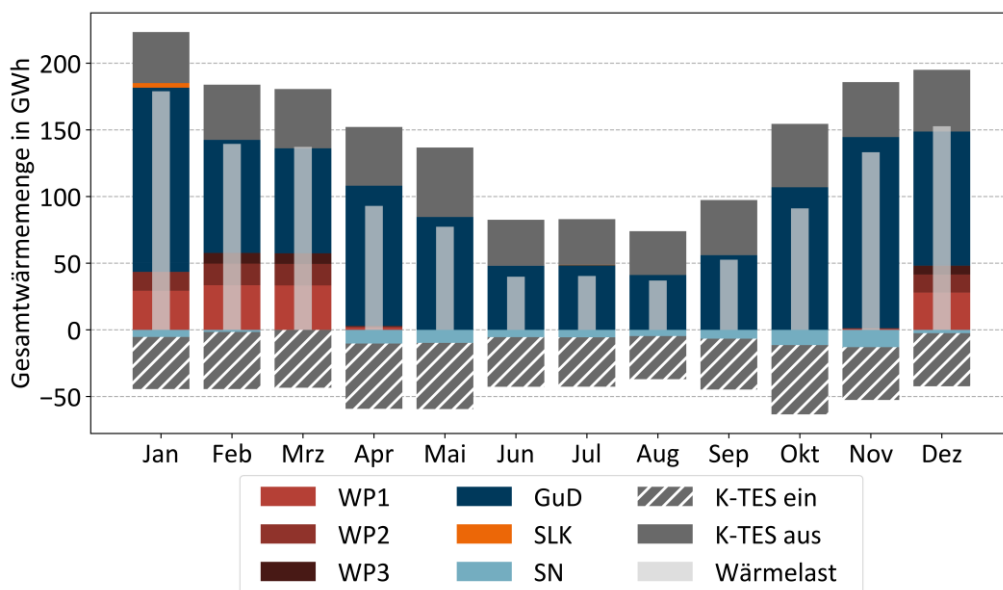


Abb. 14: Monatliche Gesamtwärmemenge nach Versorgungsanlage für das vorhandene Primärnetz im Subnetz

Ein anderes Bild ergibt sich im dritten Fallbeispiel. Die hier angebotene KWK-Technologie wird nicht installiert und leistet dementsprechend auch keinen Beitrag zur Deckung des Wärmebedarfs. Die Wärmepumpen weisen gestaffelte Leistungen zwischen 3,3 MW und 11,2 MW auf und entsprechen in Summe ca. 56 MW, was etwas mehr als die Hälfte der in der Spitze benötigten Last von ungefähr 100 MW ausmacht. Der Speicher hat in diesem Fallbeispiel eine Kapazität von knapp 12,9 GWh, was etwa 230 h Volllastbetrieb der Wärmepumpen entspricht. Damit liegt hier zum Teil auch eine saisonale Speicherung vor, die insbesondere auch im Kontext mit dem Solarfeld mit einer Fläche von ca. 161.000 m² und einer Spitzenerzeugung um die 113 MW zu sehen ist. Das Solarfeld ist damit einerseits so groß, dass der maximale sommerliche Ertragsüberschuss gegenüber der Wärmelast gerade noch durch den Speicher aufgenommen werden kann. Somit werden noch größere Flächen durch die begrenzte Ladeleistung des Speichers verhindert. Andererseits ist die Fläche aber schon etwas größer als die der derzeit größten gebauten Anlage. Insofern wird dieses Limit im Beispielfall akzeptiert. Die einzelnen Kapazitäten sind Tab. 7 zu entnehmen.

Tab. 7: Die aus der Auslegungsoptimierung resultierenden Kapazitäten des 4GDH Netzes

BHKW	WP1	WP2	WP3	WP4	WP5	WP6	WP7	Solar	K-TES
-	8,1 MW	8,6 MW	7,6 MW	3,3 MW	11,2 MW	6,2 MW	11,1 MW	161805 m ²	12,9 GWh

Abb. 15 zeigt, dass die Solarthermie den Wärmebedarf zu knapp über einem Viertel deckt. Mehr als 70 % der Wärmebereitstellung wird hier von den Wärmepumpen übernommen, die in diesem Beispiel dominieren. Auch hier ist ein Teillastbetrieb der Wärmepumpen kaum zu erkennen. Die Lastanpassung übernimmt wiederum der Speicher. Die Volllaststunden der Wärmepumpen liegen in hoher Übereinstimmung bei 4000 h/a und damit deutlich höher als in den anderen Fallbeispielen.

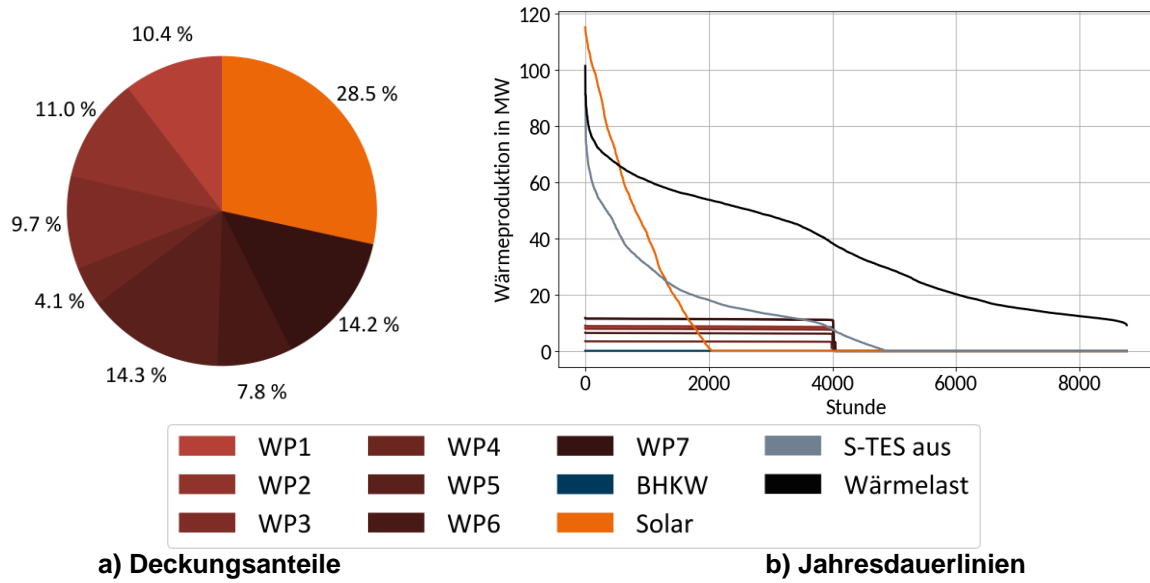


Abb. 15: Deckungsanteile und Jahresdauerlinien des 4GDH Netzes

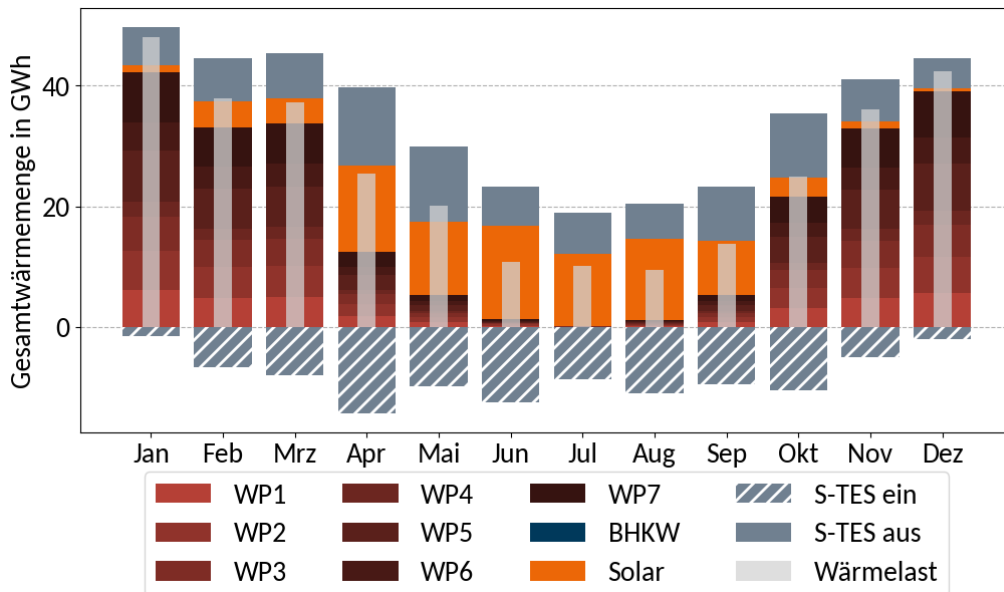


Abb. 16: Monatliche Gesamtwärmemenge nach Versorgungsanlage für das 4GDH Netz

Weil die Solarthermie den Sommerbetrieb dominiert, werden die Wärmepumpen wieder bevorzugt im Winter und in der Übergangszeit betrieben, was auch aus Abb. 16 hervorgeht. Außerdem ist der erwartungsgemäß saisonal stark schwankende Ertrag der Solarthermieanlagen sichtbar. Im Sommer und in der Übergangszeit ist ein Einsatz des Speichers als Puffer deutlich zu erkennen. Zwischen Juni und September findet in Überlagerung auch die Ladung des Speichers für den saisonalen Betrieb statt. Im Dezember oder Januar wird der Speicher nahezu ausschließlich saisonal genutzt. Die Wärmepumpen sind allerdings aufgrund ihrer gestaffelten Leistung in diesen Monaten in der Lage, die jeweils benötigte Last im Zusammenspiel mit dem Speicher darzustellen ohne in Teillast zu gehen. In diesen Monaten werden die Wärmepumpen über längere Zeit nahezu alle gleichzeitig in Volllast betrieben. Es ergibt sich so eine Speicherbewirtschaftung, die über die Darstellung des Speicherstands in Abb. 17 illustriert ist. Speicher und Solarfeld sind dabei in Kombination zu sehen. Würde eine noch größere Beladung des Speichers oder ein Verwerfen von solarthermischer Energie im Sommer akzeptiert, könnte sich eventuell ein noch stärker saisonales Profil ausprägen. Dem wird an dieser Stelle aber nicht weiter nachgegangen.



Abb. 17: Verkauf des Speicherstands über eine Betriebsperiode für das 4GDH Netz

Insgesamt ist das dritte Fallbeispiel als eine Konstellation zu verstehen, in der die Großwärmepumpen die Rolle der Leittechnologie übernehmen. Dabei profitiert der Power-to-Heat-Ansatz bei den hier unterstellten Randbedingungen allerdings davon, dass die angebotene KWK-Technologie sehr hohe Brennstoffpreise aufweist und die Nutzung der Solarthermie mit Blick auf bislang realisierte Anlagengrößen bzw. durch die Speicherbeladung limitiert ist. Eine Notkühlung von solaren Überschüssen wurde nicht berücksichtigt.

Tab. 8: Ökonomische und ökologische Ergebnisse

Kriterium	Primärnetz	Subnetz	4GDH
Wärmegestehungskosten (€/MWh)	13,45	8,33	24,34
Gesamtemissionen Gesamtmix (t)	-46.590	-127.884	36.096
Spezifische Emissionen Gesamtmix (kg/MWh)	-39,72	-103,82	114,12
Gesamtemissionen Verdrängungsmix (t)	-326.086	-534.413	59.196
Spezifische Emissionen Verdrängungsmix (kg/MWh)	-277,97	-433,86	187,16

Ergänzend zu den technischen Ergebnissen der Optimierung sind in Tab. 8 die ökonomischen und ökologischen Bewertungsgrößen dargestellt, die im Postprocessing für die drei Fallbeispiele ermittelt wurden. Für die Ergebnisse des Subnetzes ist zu beachten, dass sowohl die Wärmeproduktion des

Sub-, als auch des Primärnetzes berücksichtigt wurden. Demnach ergeben sich die geringsten Wärmegestehungskosten unter den gegebenen Rahmenbedingungen im zweiten Fallbeispiel, das auch in ökologischer Hinsicht das beste Bild abgibt.

Mit den historischen Daten der Elektrizitätsversorgung lassen sich durch den Einsatz der GuD-Heizkraftwerke Erlöse erzielen und in erheblichem Umfang CO₂-Emissionen im Gesamtsystem vermeiden. Letzteres gilt im untersuchten Fallbeispiel schon bei Ansatz des Gesamtmix der Stromerzeugung, aber noch viel mehr, wenn über den Verdrängungsmix nur der nicht-regenerative Anteil betrachtet wird. Umgekehrt ist dadurch der Betrieb von Wärmepumpen mit Emissionen belastet, solange nicht sichergestellt werden kann, dass ausschließlich erneuerbare Energien für den Antrieb der Power-to-Heat-Anlagen eingesetzt werden. In der Folge weist hier das dritte, von Wärmepumpen dominierte Fallbeispiel die ungünstigste Systemwirkung auf. Weil in diesem Fall auch die Möglichkeit fehlt, Erlöse über den Verkauf von elektrischer Energie zu erzielen, stellt sich das 4GDH-System auch als das teuerste heraus. Es muss aber schon an dieser Stelle darauf hingewiesen werden, dass die Ergebnisse für historische Randbedingungen nicht eins zu eins auf zukünftige Systeme übertragen werden können und damit für eine perspektivische Technologiebewertung nicht ausreichen. Ebenso dürfen insbesondere die Wärmegestehungskosten nicht als Absolutwerte und nicht als Kosten der Wärmelieferung interpretiert werden, weil weitere Kostenanteile, wie beispielsweise Investitions- und Betriebskosten für das Wärmenetz in der hier vorgelegten Betrachtung zur multivalenten Erzeugung unter Zuhilfenahme von Wärmepumpen fehlen.

4. Diskussion

Mit der vorliegenden Studie konnte zunächst nachgewiesen werden, dass sich mit dem hier vorgestellten Ansatz interpretierbare Ergebnisse zur Rolle von Wärmepumpen in multivalenten Wärmeversorgungssystemen generieren lassen. Die Fallbeispiele zeigen, dass dabei stark unterschiedliche Systeme behandelt werden können. Allerdings ist darauf hinzuweisen, dass die Methodik bei aller Komplexität auch einige gewichtige Vereinfachungen enthält. Dazu gehören technische Aspekte, wie die Linearisierung von Anlagencharakteristiken, welche eine Überschätzung des COP im Nennpunkt bei gleichzeitiger Effizienzminderung in Teillast mit sich zog, oder auch die Vernachlässigung von Mindestbetriebszeiten, aber auch wirtschaftliche, wie die nur zum Teil berücksichtigte Kostendegression oder die Annahme konstanter Randbedingungen über die Lebensdauer der Anlagen bei der LCOH-Berechnung.

Gerade für Technologien und Konzepte, deren Sinnhaftigkeit sich aus der Transformation des Energiesystems ergibt, müssten auf einem Transformationspfad beispielsweise verschiedene Stützjahre berücksichtigt werden, um zu beurteilen, welche Perspektive einzelne Konzepte im Rahmen der Energiewende aufweisen und wie sich diese gegebenenfalls mit deren Fortschreiten entwickeln. In diesem Sinne ist noch einmal deutlich darauf hinzuweisen, dass die Rahmenbedingungen sich auf historische energiewirtschaftliche Daten aus dem Jahr 2019 beziehen unter Berücksichtigung einer stark wirksamen Förderkulisse. Bezüglich dieser und anderer Randbedingungen wurde im Rahmen dieser Studie keine Sensitivitätsanalyse durchgeführt und die Ergebnisse auch nicht anhand von Realdaten validiert, was ohnehin eine systematische Schwierigkeit bei der Technologiebewertung für die Energiewende darstellt.

Weitergehende Untersuchungen, die diese Punkte gezielt adressieren, lassen sich aber mithilfe des hier vorgestellten Verfahrens zur Modellierung von Wärmepumpen in multivalenten Systemen anstellen, indem die vorgestellten Methoden mit entsprechend angepassten Randbedingungen eingesetzt werden. Auch bei der Bewertung von Optionen zur Ausgestaltung einer konkreten Versorgungsaufgabe können die hier präsentierten Werkzeuge hilfreich sein. Aus Sicht der Autoren kann damit eine gute

Grundlage für unternehmerische oder energiepolitische Entscheidungen und ein beschleunigter Einstieg in die Detailplanung geschaffen werden. Die hier behandelten Fallbeispiele sollten daher weniger hinsichtlich der inhaltlichen Ergebnisse weiterverwendet werden, sondern können in diesem Sinne als Ausgangspunkt für Studien mit vielfältigem Fokus dienen.

5. Zusammenfassung

Im Rahmen der vorliegenden Studie wurde eine Methodik zur Bewertung von Großwärmepumpen in multivalenten netzgebundenen Wärmeversorgungssystemen vorgestellt und auf drei Fallbeispiele – ein städtisches Fernwärmenetz, ein Subnetz, das ein bestehendes Fernwärmenetz erweitert, und ein kleineres als 4GDH Konzept angelegtes Wärmenetz – angewendet. Unter den ebenfalls beispielhaft unterstellten Rahmenbedingungen der historischen Energiesystemdaten von 2019 und einer Förderkulisse in Anlehnung an die BEW-Förderung unter Wegfall der EEG-Umlage für Power-to-Heat Anlagen werden Großwärmepumpen verschiedener Anlagengröße in alle Beispielsysteme integriert. In Kombination mit intensivem Kurzzeitspeichereinsatz werden dabei in der Tendenz eher mehrere kleine Wärmepumpen eingesetzt, die bevorzugt in Volllast betrieben werden, als einzelne sehr große.

In den ersten beiden Fallbeispielen bleiben trotzdem Erdgas-gefeuerte KWK-Anlagen die Primärversorger im Wärmenetz. Abweichend davon wird im letzten Beispiel ein mit Biogas betriebenes BHKW aufgrund der hohen Brennstoffpreise nicht installiert, dafür aber eine große Solarthermieanlage mit einem Speicher, der knapp ein Sechstel des solaren Ertrags speichern kann und sowohl saisonal als auch zur Pufferung eingesetzt wird. Der Deckungsanteil der Wärmepumpen ist im letzten Beispiel am höchsten, Wärmegestehungskosten und Emissionen dagegen in den ersten Fallbeispielen günstiger.

Die technischen, ökonomischen und ökologischen Ergebnisse hängen sehr stark von den jeweiligen Rahmenbedingungen ab. In den hier präsentierten Fallbeispielen werden etwa einerseits Betriebskosten- und Investitionsförderungen für Wärmepumpen oder Solarthermieanlagen deutlich in Anspruch genommen. Der KWK-Einsatz profitiert andererseits stark von günstigen Erdgaspreisen und KWK-Förderung sowie von der Möglichkeit, Emissionen in der konventionellen Elektrizitätsversorgung zu verdrängen und dabei erhebliche Erlöse zu erzielen. In beiden Fällen ist offensichtlich, dass solche Bedingungen nicht dauerhaft gelten werden, weshalb die hier gewonnenen Ergebnisse auch nicht in erste Linie inhaltlich genutzt werden sollten.

Vielmehr ist festzuhalten, dass sich der hier präsentierte Ansatz als grundsätzlich vielfältig nutzbar erweist und an andere Randbedingungen leicht angepasst werden kann. Verglichen mit überschlägigen Bewertungsansätzen werden im vorgeschlagenen Ansatz zeitabhängige Energiepreise und Emissionen, lastabhängige Anlageneffizienz und eine Optimierung von Auslegung und Einsatz genutzt. Das erhöht zwar den Aufwand und die Anforderungen an die Modellierung, aber erweist sich auch als relevant, wie sich beispielsweise an der Bevorzugung von Volllast gegenüber Teillast oder daran zeigt, dass die Anlagen bei variierenden energiewirtschaftlichen Rahmenbedingungen auch innerhalb des Betrachtungszeitraums unterschiedlich eingesetzt werden. Insofern steht mit der hier beispielhaft demonstrierten techno-ökonomischen MILP-Optimierung auf Basis komponentengenaue Anlagen-simulationen ein zwar anspruchsvolles, aber auch kraftvolles Werkzeug zur Verfügung.

6. Danksagung

Teile der dieser Studie zugrundeliegenden Arbeit wurden durch das Programm „HWT Energie und Klimaschutz“ gefördert. Die Autoren danken der Gesellschaft für Energie und Klimaschutz Schleswig-Holstein für die Unterstützung.

7. Literaturverzeichnis

- [1] D. Connolly, B. V. Mathiesen, P. A. Østergaard, B. Möller, S. Nielsen, H. Lund, D. Trier, U. Persson, D. Nilsson und S. Werner, „Heat Roadmap Europe: First Pre-Study for EU27,“ 2012.
- [2] Z. Ma, A. Knotzer, J. D. Billanes und B. Nørregaard Jørgensen, „A literature review of energy flexibility in district heating with a survey of the stakeholders’ participation,“ *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2020.
- [3] D. Connolly, B. V. Mathiesen, P. A. Østergaard, B. Möller, S. Nielsen, H. Lund, U. Persson, S. Werner, J. Grözinger, T. Boermans, M. Bosquet und D. Trier, „Heat Roadmap Europe 2: Second Pre-Study for the EU27,“ 2013.
- [4] S. Buffa, M. Cozzini, M. D’Antoni, M. Baratieri und R. Fedrizzi, „5th generation district heating and cooling systems: A review of existing cases in Europe,“ *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, pp. 504-522, 2019.
- [5] C. Arpagaus, F. Bless, M. Uhlman, J. Schiffmann und S. S. Bertsch, „High temperature heat pumps: Market overview, state of the art, research status, refrigerants, and application potentials,“ *Energy*, pp. 985-1010, 2018.
- [6] J. Freißmann, M. Fritz und I. Tuschy, „Modellierung von Hochtemperaturwärmepumpen in der integrierten Simulation von multivalenten Wärmeversorgungs-systemen,“ in *HAWK Hochschule für angewandte Wissenschaft und Kunst*, 2023.
- [7] T. Ommen, W. Brix Markussen und B. Elmegaard, „Comparison of linear, mixed integer and non-linear programming methods in energy system dispatch modelling,“ *Energy*, pp. 109-118, 2014.
- [8] M. Fritz, J. Freißmann und I. Tuschy, „Hochtemperaturwärmepumpen in der Nah- und Fernwärmeversorgung - Technologieperspektive für den kurz- und mittelfristigen Einsatz in multivalenten Systemen,“ 2024.
- [9] U. Krien, P. Schönfeldt, J. Launer, S. Hilpert, C. Kaldemeyer und G. Pleßmann, „oemof.solph - A model generator for linear and mixed-integer linear optimisation of energy systems,“ *Software Impacts*, 2020.
- [10] S. Hilpert, C. Kaldemeyer, U. Krien, S. Günther, C. Wingenbach und G. Plessmann, „The Open Energy Modelling Framework (oemof) - A new approach to facilitate open science in energy system modelling,“ *Energy Strategy Reviews*, pp. 16-25, 2018.
- [11] W. E. Hart, C. D. Laird, J.-P. Watson, D. L. Woodruff und G. A. Hackebeil, „Pyomo — Optimization Modeling in Python,“ 2017. [Online]. Available: https://www.ebook.de/de/product/33462170/william_e_hart_carl_d_laird_jean_paul_watson_.
- [12] F. Witte und I. Tuschy, „TESPy: Thermal Engineering Systems in Python,“ *JOSS*, 2020.
- [13] I. H. Bell, J. Wronski, S. Quoilin und V. Lemort, „Pure and Pseudo-pure Fluid Thermophysical Property Evaluation and the Open-Source Thermophysical Property Library CoolProp,“ *Industrial & Engineering Chemistry Research*, p. 2498–2508, 2014.
- [14] Deutscher Wetterdienst. Regenerative Energien, „Globalstrahlung: Summe aus direkter und diffuser,“ [Online]. Available: <https://www.dwd.de/DE/leistungen/solarenergie/solarenergie.html..>

- [15] 1985-02, DIN 5034-2, *Tageslicht in Innenräumen; Grundlagen*.
- [16] P. Konstantin, Praxisbuch Energiewirtschaft Energieumwandlung, -transport und -beschaffung im liberalisierten Markt, Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 2013.
- [17] Agora Energiewende, „Agorameter -- Dokumentation (Version 10),“ 2020.
- [18] ENTSO-E, „ENTSO-E Transparency Platform,“ [Online]. Available: <https://transparency.entsoe.eu/>.
- [19] Agora Energiewende, *Agorameter: German Net Power Generation, Consumption and Commercial Exports 2016*.
- [20] W. Mauch, R. Corradini, K. Wiesemeyer und M. Schwentzek, „Allokationsmethoden für spezifische CO₂-Emissionen von Strom und Wärme aus KWK-Anlagen,“ *Energiewirtschaftliche Tagesfragen*, 2010.
- [21] H. Lund, S. Werner, R. Wiltshire, S. Svendsen, J. E. Thorsen, F. Hvelplund und B. V. Mathiesen, „4th Generation District Heating (4GDH) Integrating smart thermal grids into future sustainable energy systems,“ *Energy*, pp. 1-11, 2014.
- [22] M. Fritz und J. Freißmann, *maltefritz/RET.Con2024_WP: Initial Release*, Zenodo, 2024.
- [23] Stadtwerke Flensburg GmbH, „Network Data of the District Heating System of the city of Flensburg from 2017-2019,“ 2024. [Online]. Available: <https://zenodo.org/record/10508280>.
- [24] Sønderborg Varme A/S, „Network Data of the District Heating System for the city of Sønderborg from 2016-2019,“ 2023. [Online]. Available: <https://zenodo.org/record/7972964>.
- [25] J. Freißmann, M. Fritz und I. Tuschy, „Solarthermisch gestützte Nah- und Fernwärmeversorgung als Baustein der sektorgekoppelten Wärmewende in Schleswig-Holstein,“ 2022.
- [26] Arbeitsgemeinschaft Fernwärme (AGFW), „Fernwärme - Preisübersicht (Stichtag 01.10.2020,“ 2020. [Online]. Available: [https://www.agfw.de/energiewirtschaft-recht-politik/wirtschaft-und-markt/markt-preise/preisanpassung](https://www.agfw.de/energiewirtschaft-rechtspolitik/wirtschaft-und-markt/markt-preise/preisanpassung).
- [27] European Energy Exchange (EEX), *EGIX Erdgaspreisindex der PEGAS (2010 - 2020)*, 2020.
- [28] S. Kolb, „Szenarien für die Integration erneuerbarer Gase in den deutschen Gasmarkt bis 2050: Eine modellgestützte Analyse,“ Dissertation, Technische Fakultät, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU), Erlangen, 2022.
- [29] E. Dunkelberg, A. Deisböck, B. Herrmann, B. Hirschl, T. Mitzinger, J. Röder, S. Salecki, P. Thier und T. Wassermann, „Fernwärme klimaneutral transformieren: Eine Bewertung der Handlungsoptionen am Beispiel Berlin Nord-Neukölln,“ Berlin, 2020.
- [30] Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz, *Gesetz über den Handel mit Berechtigungen zur Emission von Treibhausgasen*, 2011.
- [31] Zoll online, „Steuerentlastungstatbestand,“ 2021. [Online]. Available: https://www.zoll.de/DE/Fachthemen/Steuern/Verbrauchssteuern/Energie/Steuerbegünstigung/Steuerentlastung/KWKAnlagen/Vollstaendige-Steuerentlastung/Steuerentlastungstatbestand/steuerentlastungstatbestand_node.html.
- [32] K. Jührich, *CO₂-Emissionsfaktoren für fossile Brennstoffe*, Umweltbundesamt, 2016.

- [33] BAFA, „Informationsblatt CO2-Faktoren,“ Berlin, 2021.
- [34] BAFA, „Modul 2: Antragstellung und Verwendungsnachweise: Bundesförderung für effiziente Wärmenetze (BEW),“ Berlin, 2023.
- [35] BAFA, „Modul 3: Antragstellung und Verwendungsnachweis: Bundesförderung für effiziente Wärmenetze (BEW),“ Berlin, 2023.
- [36] BAFA, „Modul 4: Antragsstellung: Bundesförderung für effiziente Wärmenetze (BEW),“ Berlin, 2023.
- [37] K.-M. Adamson, T. G. Walmsley, J. K. Carson, Q. Chen, F. Schlosser, L. Kong und D. J. Cleland, „High-temperature and transcritical heat pump cycles and advancements: A review,“ *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, p. 112798, Oct 2022.
- [38] European Union-Copernicus Marine Service, *Global Ocean OSTIA Sea Surface Temperature and Sea Ice Analysis*, Mercator Ocean International, 2015.
- [39] G. Kosmadakis, C. Arpagaus, P. Neofytou und B. Bertsch, „Techno-economic analysis of high-temperature heat pumps with low-global warming potential refrigerants for upgrading waste heat up to 150 °C,“ *Energy Conversion and Management*, Nr. 226, p. 113488, dec 2020.
- [40] S. Lemmens, „Cost Engineering Techniques and Their Applicability for Cost Estimation of Organic Rankine Cycle Systems,“ *Energies*, Nr. 9, p. 485, jun 2016.
- [41] T. Ommen, J. K. Jensen, W. B. Markussen, L. Reinholdt und B. Elmegaard, „Technical and economic working domains of industrial heat pumps: Part 1 – Single stage vapour compression heat pumps,“ *International Journal of Refrigeration*, Nr. 55, 168--182 jul 2015.
- [42] C. R. Harris et al, , „Array programming with NumPy,“ *Nature, Springer Science and Business Media LLC* , Nr. 585, pp. 357-362, 2020.

8. Anhang

Tab. 9: Anlagenparameter der Wärmepumpe mit paralleler Kompression mit offenem Economizer in TESPy

Parameter	Wert	Einheit
Nennleistung	50	MW
Kältemittel	R717	-
Minimaler Teilmassenstrom	30	%
Isentropenwirkungsgrad (Kompressoren)	75	%
Isentropenwirkungsgrad (Pumpen)	80	%
Betriebsdruck Fernwärmenetz	10	bar
Druckverhältnis über WÜT	98	%
Grädigkeiten (Verdampfer/Verflüssiger)	2	K

Waste heat from mobile groups of people in energy system optimisation

Patrik Schönfeldt¹, Diana Maldonado¹, Maximilian Hillen^{2,3}

¹ German Aerospace Center (DLR),
Institute of Networked Energy Systems, Oldenburg, Germany

² German Aerospace Center (DLR),
Institute of Solar Research, Jülich, Germany

³ RWTH Aachen University,
Chair of Solar Components, Aachen, Germany

1 Abstract

The heat emitted by people indoors ranges from 70 W to 150 W [1], depending on the activity. This waste heat is taken into account in the design of cooling systems, but can also be used for heating. This article considers the control of mobile groups of people in an office building without fixed desks and in an airport in order with several waiting rooms, to optimise the use of their waste heat. A linear optimisation model based on oemof.solph [2] is used for the calculation, which takes into account both the thermal inertia of the building and the ability to influence the movement of groups of people in the building within a given framework. This work presents the formulation of the model, explains the assumptions made and compares optimisation results with standard operation.

2 Introduction

The consideration of internal gains in the design of buildings is a common practice, however, they are often incompletely considered in the operational optimisation of the energy system [3], [4]. Pallikere et. al [5] and Pisello et. al [6] examine existing occupancy plans for buildings to optimise the operation of the energy system. The control of mobile groups of people within airports though the tracking of their mobile devices to prevent queues or mitigate potential security risks has become increasingly prevalent [7]. However, the adaptation of occupancy plans to optimise the whole energy system has not been considered in previous work. This creates the potential to use the waste heat from people directly to heat spaces, or to distribute people across multiple spaces to

reduce the cooling loads. Buildings with planned flows of people are particularly suitable for this. In addition to railway stations and airports, these also include cinemas, theatres, offices, universities and schools. This is already done manually in control systems, so heating is often reduced in anticipation of an event, reducing the need cooling during the event. Lowering the temperature in unoccupied rooms has also long been a practised strategy of energy management. On the other hand, this study examines the short-term adjustment of occupancy schedules and flows of people as well as system control, as part of a more comprehensive energy-efficient operational optimisation.

In this study, we consider two of the aforementioned building types, namely airport and an office building.

3 Methodology

3.1 Energy System Model

The room air temperature T_n is of central interest in this work. It is assumed that it can be directly controlled by a ventilation system. When people are present in the room n , the room temperature must be permanently maintained between 20 °C and 23 °C. No corresponding specification is made in empty rooms. The heat stored in the room n is

$$Q_n = (T_n - T_{\text{ref}}) \times V_n \times \rho c_p, \quad (1)$$

where V_n is the volume of the room, ρ is the density of the air and c_p is the specific heat capacity of the air. Here we neglect the fact that the volume of the air changes with the occupancy of the room and assume that the density of the air is constant.

The energy balance of the room n is depicted in Figure 1. The shown heat flows are explained and defined in the following.

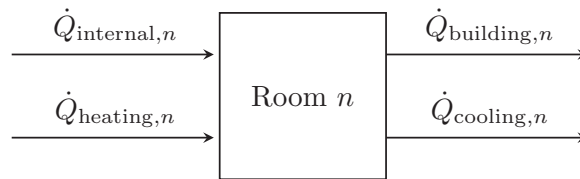


Figure 1: Energy balance of a room with energy flows

From the temperature difference between the current room air T_n and at the outlet temperature of the conditioner T_c the power of the air conditioner can be calculated as

$$\dot{Q}_{\text{conditioning},n} = (T_n - T_c) \times \dot{V} \rho c_p = \begin{cases} \dot{Q}_{\text{heating},n}, & \text{when } T_n \leq T_c \\ -\dot{Q}_{\text{cooling},n}, & \text{when } T_n > T_c, \end{cases} \quad (2)$$

where \dot{V}_n is the volume flow of the ventilation. Note that we define \dot{Q}_{cooling} to be positive when there is cooling.

There is also heat loss through the walls of the room. Due to the short time horizon of our optimisation and because this study focuses on the integration of the flow of people, a constant value for the walls T_w is assumed as 18 °C and 17 °C, for the airport and offices respectively. Without limiting generality, for both cases the same temperature is chosen as the reference temperature.

According to [8], the heat transfer coefficient is $h_w = 7.14 \text{ W/m}^2\text{K}$ between the room air and the wall, $h_c = 10.14 \text{ W/m}^2\text{K}$ between the room air and the ceiling, and $h_f = 5.84 \text{ W/m}^2\text{K}$ between the room air and the floor. This results in a heat transfer between the room air and the respective surface of

$$\dot{Q}_{\text{building},n} = (T_n - T_w) \times (h_w A_w + h_f A_f + h_c A_c), \quad (3)$$

where the area of the walls A_w , the area of the ceiling A_c , and the floor area A_f .

For this purpose, the temperature of the air in the room is assumed to be fully mixed. In this study, it is always greater than T_w . For the airport analysis, three square waiting rooms are assumed with an area of 180 m² and a height of 15 m [9]. The offices have an area of 30 m² and a height of 2.5 m. For a detailed analysis, the thermal inertia of the building material could be modelled more precisely, e.g. using a 5R2C model [10].

For the internal gains of the room, the waste heat of the N_n people in the room

$$\dot{Q}_{\text{internal},n} = N_n \times \dot{Q}_{\text{person}} \quad (4)$$

is taken into account. In this sense, $\dot{Q}_{\text{person}} = 100 \text{ W}$ has been assumed. This choice is not meant to be the most realistic one but to facilitate the analysis of the results.

In total, in the energy in room n at time t can be expressed as

$$Q_n(t) = Q_n(t - \Delta T) + \int_{t-\Delta T}^t dt' \left(\dot{Q}_{\text{internal},n}(t') + \dot{Q}_{\text{conditioning}}(t') - \dot{Q}_{\text{building},n}(t') \right), \quad (5)$$

where $t - \Delta T$ is an earlier point in time. When working with discrete time steps, the integral becomes the product by the time resolution Δt .

For the optimisation, $Q_{\text{conditioning}}$ for the airport, and Q_{heating} for the offices, are minimised. The latter choice reflects the option to open windows for cooling. Note that Eq. (4) makes the number of persons an optimisation variable.

3.2 Movement Model

We use a simple model to express the movement of people, as it is shown in Figure 2. For the sake of simplicity, the movement of each individual person is not tracked, but analysed considering the time series of arrivals and departures,

the number of persons N_n in the rooms and the rooms (binary) occupancy status $y_n \in \{0, 1\}$. The latter is calculated using

$$y_n(t) > N_n(t)/N_{n,\max}, \quad (6)$$

where $N_{n,\max}$ is the capacity of the room.

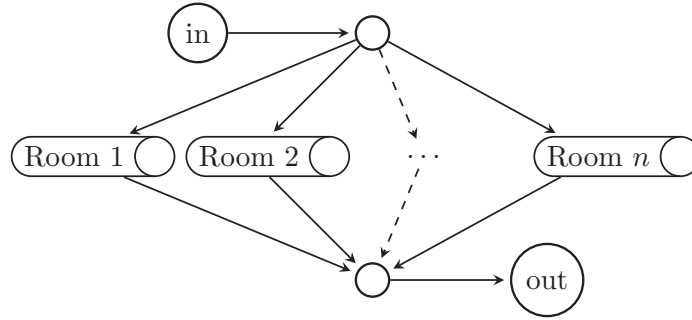


Figure 2: Simple model for the movement of people. People move into a room after arrival (in) and stay there until the end (out).

Note that in this model, a constant number of people present at the same time allows different levels of flexibility: in the office, most people will arrive in the morning and leave in the evening, so the occupancy of the desks cannot be changed during the day. At the airport, on the other hand, people are constantly arriving and departing.

Airport terminals are complex hubs where passenger arrival times must be predicted and managed to avoid delays and bottlenecks. This arrival time can be understood as the time it takes for passengers to arrive at the check-in counters before boarding. The arrival time of the passengers can be calculated as a Weibull distribution

$$f(x) = \frac{\beta}{\alpha^\beta} x^{\beta-1} \times \exp \left[-\left(\frac{x}{\alpha}\right)^\beta \right] \quad (7)$$

described by [11], [12]. Here, x is the parameter for the arrival time or arrival location of the passenger, α is the scale parameter and β is the shape parameter. For a general domestic flight, $\alpha = 4.5$ and $\beta = 1.3$ are selected, for an (international) EU Schengen flight $\alpha = 4.0$ and $\beta = 1.9$. Four waiting rooms are modelled as described above, each with a maximum capacity of 300 people. This leaves the option of using only two of the rooms. Figure 3 shows the cumulative number of people present at the airport over the course of a day, based on their flight schedules.

For the occupancy of the office building, historic data from the DLR-VE office building is used. The original time series contains the total number of people present at any minute in the year of 2016. The data is anonymised by disregarding a random number of people per day by setting an offset. Despite these changes, the resolution of the data is considered to be sufficient to reliably

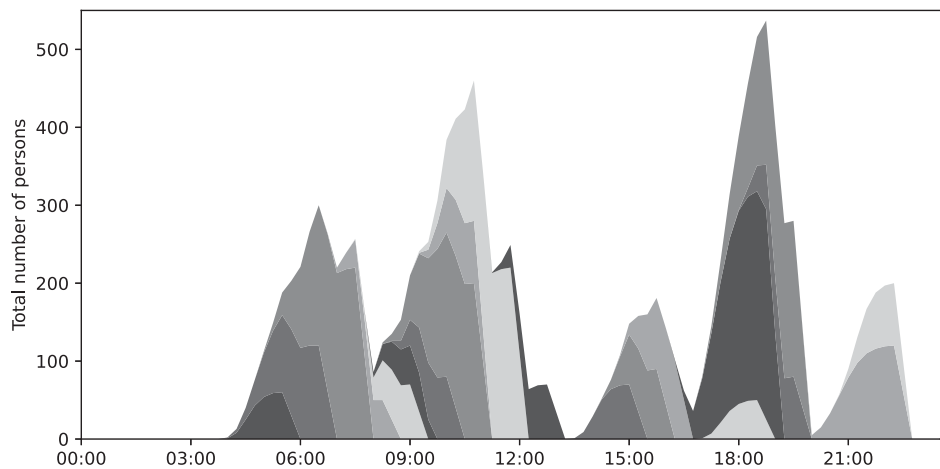


Figure 3: Total number of persons at the airport. Each flow is shown in a different shade of grey to distinguish between flights.

identify the arrival and departure times of people. Five offices are modelled as described above, each with a maximum capacity of five people. As for the airport model, this leaves the option to let one of the rooms completely unused.

4 Results

The optimisation results for both scenarios are quite similar. It is particularly noteworthy that the differences between the cases are mostly due to the costs of cooling. If the goal of optimisation is changed from minimising air conditioning to minimising heating or vice versa, the resulting strategies match for office and airport.

For both, the heating is turned on only just before the first people arrive in a room between 7 and 8 am. At around 6 pm, the temperature is brought to the maximum allowed using waste heat from persons to reduce the demand for heating in the morning.

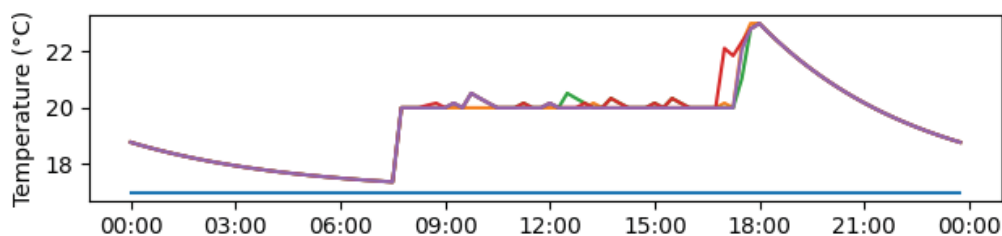


Figure 4: Optimised temperatures in the office scenario. Different colours signify the individual rooms.

In the office scenario (see Fig. 4), that avoids heating but allows free cooling, one room is left unoccupied. In fact, this only prevents the initial heat-up: If at least one person is present, its waste heat will be sufficient to keep the room warm. In the other rooms, the temperature occasionally deviates from 20 °C. As there is no optimal temperature, these deviations are mostly random and can be seen as people letting the room heat up and then opening the windows a bit further just until 20 °C are met again. As mentioned before, by the end of the day, there is a good reason to increase the temperature using the internal gains. Thus, the optimiser does so.

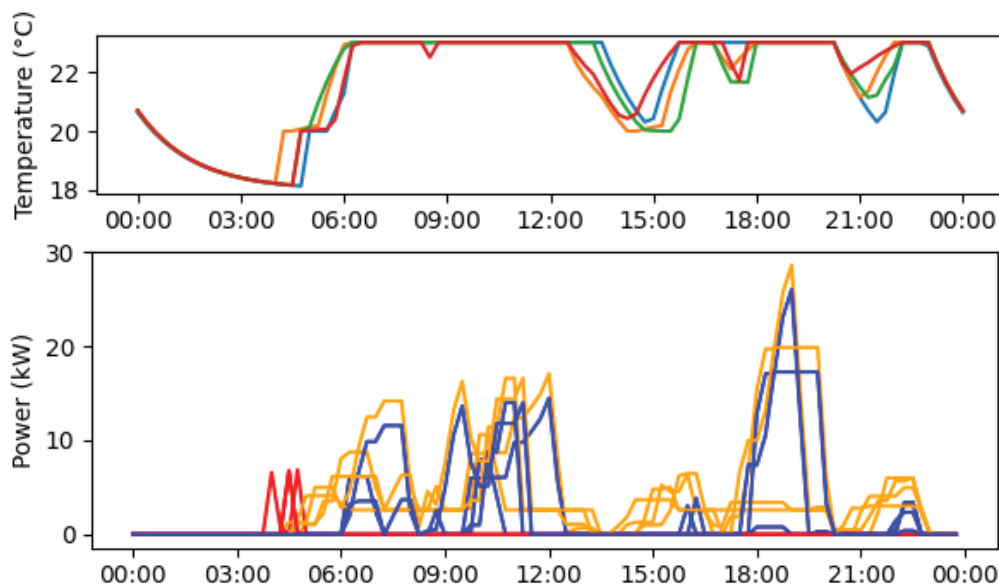


Figure 5: Top: Optimised temperatures for each waiting room, shown in different colours. Bottom: Heat flows by type for the airport scenario; red: heating, orange: heat from persons, blue: cooling

In the airport scenario, that also minimises cooling demands, all of the rooms are used (see Fig. 5). This can be explained by the increased surface that can absorb more heat. To intensify this effect, the room temperature is left at the upper limit. It is noteworthy, that in the morning the first people arriving at the airport are distributed almost evenly, so that neither heating nor cooling is needed. The same is true in the early afternoon, where fewer people are around. Still, the heat of the people is sufficiently high to keep the temperature from falling below 20 °C; only initially, each of the rooms is heated actively so that the first guests may enter. Most of the time, the internal gains have to be compensated mostly by the ventilation system.

In comparison to standard use, the optimisation results in a reduction of the office heating demands of about 20 % by leaving one room (out of five) unoccupied. This number is probably bigger than it would be in the real world: Setting the walls to constant temperatures is a valid approximation just if it

is constantly heated. Not heating a room in the end will increase the heat demands of other rooms that lose more heat through walls touching the cold one, reducing the overall benefit. The demand for heating is further reduced by 10 % (offices) and 5 % (airport) by increasing the temperature using the heat of the people at the end of the day. The difference in the values is mainly due to the higher loss rate we assumed for the airport room. Letting the temperature reach 23 °C instead of constantly conditioning to 20 °C reduces the demand for cooling in the airport example by about 100 kWh (from 255 kWh to 146 kWh). Note that this is due to the added degree of freedom and not due to the optimisation per se.

5 Summary and outlook

We introduced a way to implement waste heat from mobile groups of persons in a mixed integer linear model. This way, we are able to optimise the flow of people under energetic aspects. The results in our examples reproduce standard strategies, e.g. grouping persons in less rooms to save heating costs or spreading people to save cooling costs. On the one hand, this underlines the feasibility of the method, on the other hand, the simplicity of the optimal strategies means that they can also be applied without an optimisation model. To fully quantify the potential, future studies should include more complex models for exchange of air through the doors of the waiting rooms and for the thermal inertia of the wall.

Acknowledgements

Work of PS is funded by the Federal Ministry of Education and Research (BMBF) within the project “WärmewendeNordwest” (grant no 03SF0624L).

References

- [1] “Calculation of thermal loads and room temperatures (design cooling load and annual simulation),” VDI, Berlin, Germany, VDI 2078, Jun. 2015.
- [2] U. Krien, P. Schönfeldt, J. Launer, S. Hilpert, C. Kaldemeyer, and G. Pleßmann, “Oemof.solph—a model generator for linear and mixed-integer linear optimisation of energy systems,” *Software Impacts*, vol. 6, p. 100028, 2020, ISSN: 2665-9638. DOI: [10.1016/j.simpa.2020.100028](https://doi.org/10.1016/j.simpa.2020.100028).
- [3] D. H. Dorrah and M. Marzouk, “Integrated multi-objective optimization and agent-based building occupancy modeling for space layout planning,” *Journal of Building Engineering*, vol. 34, p. 101902, 2021, ISSN: 2352-7102. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101902>. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S235271022033535X>.

- [4] R. Evins, “Multi-level optimization of building design, energy system sizing and operation,” *Energy*, vol. 90, pp. 1775–1789, 2015, ISSN: 0360-5442. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.07.007>. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544215009019>.
- [5] A. Pallikere, R. Qiu, P. Delgoshaei, and A. Negahban, “Incorporating occupancy data in scheduling building equipment: A simulation optimization framework,” *Energy and Buildings*, vol. 209, p. 109 655, 2020, ISSN: 0378-7788. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109655>. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778819320432>.
- [6] A. L. Pisello, M. Bobker, and F. Cotana, “A building energy efficiency optimization method by evaluating the effective thermal zones occupancy,” *Energies*, vol. 5, no. 12, pp. 5257–5278, 2012. DOI: 10.3390/en5125257.
- [7] *Data processing and crowd management*, Accessed: December 18, 2023, Schiphol Airport. [Online]. Available: <https://www.schiphol.nl/en/page/data-processing-crowd-management/>.
- [8] International Organization for Standardization, “Building components and building elements thermal resistance and thermal transmittance,” ISO, Draft International Standard ISO/DIS 6946, 2015.
- [9] Lin Lin, Xiaochen Liu, Xiaohua Liu, Tao Zhang, and Yang Cao, “A prediction model to forecast passenger flow based on flight arrangement in airport terminals,” *Energy and Built Environment*, vol. 4, no. 6, pp. 680–688, 2023, ISSN: 2666-1233. DOI: 10.1016/j.enbenv.2022.06.006. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666123322000423>.
- [10] J. H. Kämpf and D. Robinson, “A simplified thermal model to support analysis of urban resource flows,” *Energy and Buildings*, vol. 39, no. 4, pp. 445–453, 2007, ISSN: 0378-7788. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2006.09.002>.
- [11] M. Schultz and H. Fricke, “Managing passenger handling at airport terminals,” 2011. [Online]. Available: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:18631264>.
- [12] M. N. Postorino, L. Mantecchini, C. Malandri, and F. Paganelli, “Airport passenger arrival process: Estimation of earliness arrival functions,” *Transportation Research Procedia*, vol. 37, pp. 338–345, 2019, ISSN: 23521465. DOI: 10.1016/j.trpro.2018.12.201.

Hochaufgelöste Langzeitprognose des deutschen Strom-Importpotenzials mithilfe von Methoden des Maschinellen Lernens

Dominik Dörr¹, Justin Münch¹, Prof. Dr. Mario Adam¹

¹ Zentrum für Innovative Energiesysteme (ZIES), HS Düsseldorf

Projektpartner: Lehrstuhl für Energiesystemökonomik (FCN ESE), RWTH Aachen

Abstract

Die Autoren präsentieren einen Methodenvergleich zur Langzeitprognose des deutschen Strom-Importpotenzials mit einer hohen zeitlichen Auflösung. Für die Prognose wurden die nachfolgenden Methoden aus dem Bereich des Maschinellen Lernens betrachtet: *Feed-Forward-Neural-Network*, *Recurrent-Neural-Network*, *Extreme Gradient Boosting* und *Gaussian Process*. Verwendet wurden stündliche historische Daten des Stromlastganges und der Wetterdaten für Deutschland von 2006 bis 2013 für die Trainings der Modelle und 2014/15 für die Bewertung der Modellprognosen. Zur ersten Bewertung wurde bei den Neuronalen Netzen die *Single-Holdout* Methode angewandt, um geeignete *Hyperparameter* in kurzer Zeit identifizieren zu können. Die Optimierung der *Hyperparameter* erfolgte bei allen Methoden mithilfe eines *Search Grid*, bei dem alle möglichen Variationen eines Hyperparameterasters getestet und die Ergebnisse abgespeichert wurden. Die Modelle mit der besten Performance wurden ausgewählt und mit einer Kreuzvalidierungsmethode, dem sogenannten *Time-Series-Split*, trainiert, um eine Überanpassung (Overfitting) an die Trainingsdaten zu vermeiden. Das *Extreme Gradient Boosting* erzielte hierbei von den verwendeten Methoden mit einem MAPE von 2,67 % die höchste Prognosegüte. Diese Methode hat im Vergleich zu den anderen verwendeten Methoden zudem den Vorteil, dass sie einfacher zu implementieren und zu konfigurieren ist. Bei den anderen Methoden mit MAPE-Werten zwischen 3,5 und 5,2 sind jedoch noch Verbesserungsmöglichkeiten gegeben bzw. sehr wahrscheinlich. Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass mit den Methoden des Maschinellen Lernens ein performantes und präzises Prognosemodell für das deutsche Stromimportpotenzial in Form von *Extreme Gradient Boosting* gefunden wurde.

1. Einleitung und Motivation

Die Chancen, die sich durch den Ausbau der Erneuerbaren Energien in Kombination mit der Sektorenkoppelung ergeben, sind immens, doch Unsicherheiten, insbesondere bzgl. der Versorgungssicherheit, hemmen den notwendigen Wandel. Die aktuelle Energiekrise mit der Umgestaltung der Gasversorgung Deutschlands sowie die erfolgte Abschaltung der verbliebenden Atomkraftwerke verschärfen die Debatte.

Im Projekt *Künstliche Intelligenz zur Untersuchung der Versorgungssicherheit mit Elektrizität* (KIVI) entwickeln Wissenschaftler*innen der Hochschule Düsseldorf und der RWTH Aachen interdisziplinär neue Ansätze zur Versorgungssicherheitsbewertung unter Zuhilfenahme von Methoden des Maschinellen Lernens und Künstlicher Intelligenz. Diese Methoden sollen u.a. hochaufgelöste, präzise Langzeitprognosen der relevanten Randbedingungen und der Versorgungssicherheit im deutschen Stromsystem ermöglichen.

Das deutsche Stromnetz kann bei einer vollständigen Betrachtung nicht nur auf die nationale Ebene beschränkt werden, da u.a. Stromimport und -export einen erheblichen Einfluss haben. Durch die Nutzung des großräumigen Netzverbundes bieten sich Chancen, sowohl für die Senkung der Treibhausgas-Emissionen in Europa durch den Export von Strom aus erneuerbarer Energie als auch die Verbesserung der Versorgungssicherheit in Deutschland durch die Einbindung des Stromimports als Reserve. Letzteres erfordert jedoch eine präzise Vorhersage des Importpotenzials der Anrainerländer, was Gegenstand der vorliegenden Arbeit ist.

Die Arbeit konzentriert sich auf die Methoden des Maschinellen Lernens sowie das methodische Vorgehen zur optimalen Auswahl geeigneter Modelle. Neben dem Vergleich verschiedener Methoden des Maschinellen Lernens, darunter *Feed-Forward-Neural-Network*, *Recurrent-Neural-Network*, *Extreme Gradient Boosting* und *Gaussian Process*, liegt der Fokus auf den zur Prognose verwendeten *Features*. Zur ersten Approximation der Prognosegüte der untersuchten Modelle und der Relevanz der ausgewählten Daten wird der *Single-Hold-Out* verwendet. Die *Hyperparameter* der verwendeten Modelle werden mit einem manuellen *Search Grid* untersucht und ausgewählt. Das finale Training mit den als gut bewerteten Modellen und *Features* wird mit einer Form der *Cross-Validation* durchgeführt, wobei die Besonderheiten der Zeitreihenprognose berücksichtigt werden.

2. Methodik

Die eingesetzten Methoden des Maschinellen Lernens wurden mit identischen Datensätzen trainiert, dazu gehören verschiedene Klimadaten (Temperatur, Solare Strahlung, Niederschlag und weitere), sowie der Lastgang des Standorts Deutschland der Jahre 2006 bis 2013 (Trainingsdatensatz). Zur Bewertung der Prognosegüte wird der Zeitraum von 2014 bis 2015 (Testdatensatz) angesetzt. Die Anzahl der Daten, d.h. die verwendeten *Features*, wurde variiert und die Hyperparameter entsprechend Optimierung. Die erzielte Prognosegüte der einzelnen Methoden in Abhängigkeit der verwendeten *Features* unterscheidet sich stark. Das bedeutet, dass je nach Methode eine unterschiedliche Auswahl an *Features* zu einem besseren Ergebnis geführt haben. Auf den Einfluss der verwendeten *Features* auf die Prognosegüte wird im nachfolgenden nicht näher eingegangen, sodass lediglich die Prognosemodelle mit der höchsten Prognosegüte jeder Methode präsentiert werden.

Um die Auswahl geeigneter Modelle zu beschleunigen und Hyperparameteranpassungen bereits nach relativ kurzen Trainingszeiten bewerten zu können, wurde auf das *Single Holdout-Verfahren* zurückgegriffen. Dabei werden die Trainingsdaten nicht, wie eigentlich üblich in Trainings- und Validierungsdaten getrennt, sondern die Testdaten werden gleich während des Trainings zur Verifikation genutzt. Hierdurch entfällt die jedoch die Möglichkeit die Prognosegüte des Prognosemodell anhand von unabhängigen Daten zu bewerten. Zusätzlich besteht ein hohes Risiko des Overfittings an den Testdaten. Auch wenn sich diese Methode nicht für ein finales Training von Modellen eignet, konnte so eine effiziente Abschätzung der Performance der unterschiedlichen Methoden vorgenommen werden.

Die ausgewählten Modelle werden im Folgenden kurz erläutert:

2.1 Künstliche Neuronale Netze

Bei den verwendeten *Feed-Forward-* und *Recurrent-Neural-Network* (RNN) handelt es sich um Methoden des *Deep Learnings*. Es sind Neuronale Netze, die dem menschlichen Gehirn nachempfunden sind und mithilfe einer großen Anzahl an Neuronen, die Operatoren dieser Netzwerke, in der Lage sind präzise Prognosen zu treffen. Diese Neuronen befinden sich auf einer Anzahl an Definierten Schichten, dargestellt in Abbildung 1. Die erste Schicht (Input-Layer) nimmt die *Features* auf und gibt diese Werte an die dahinterliegenden Layer weiter. Hierbei ist jedes Neuron mit allen Neuronen der darauffolgenden Schicht verbunden. Die letzte Schicht (Output-Layer) gibt die Zielgröße aus. Damit geben die Daten die Grundstruktur des Netzwerkes vor, da die Neuronen auf dem Input-Layer mit der Anzahl der *Features* übereinstimmen müssen, während das Output-Layer mit der Anzahl der erwarteten Zielgrößen identisch sein muss. Die Netzwerke müssen mit geeigneten Daten trainiert werden, um einen Zusammenhang zwischen Eingangsdaten und Zielgröße bestimmen zu können. Hierbei verarbeiten die Neuronen die empfangenden Daten, indem diese mit Hilfe von Aktivierungsfunktionen gewichtete Summen bilden. In einem iterativen Trainingsprozess werden diese Gewichte so angepasst, dass eine zuvor definierte Fehlerfunktion minimiert wird.

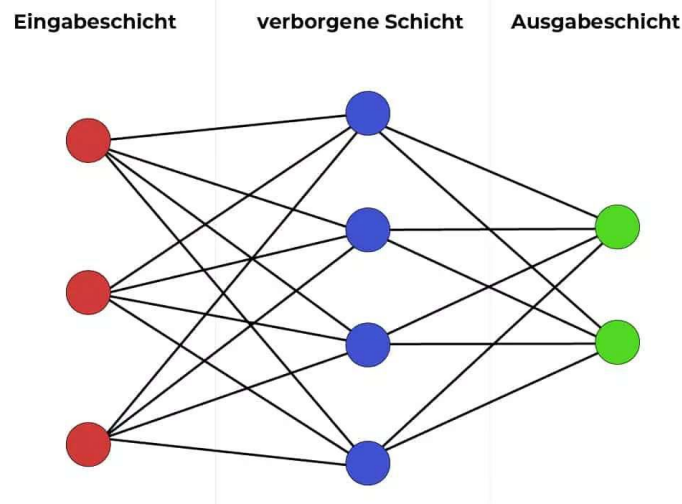


Abbildung 1: Aufbau eines Neuronalen Netzwerks (<https://datasolut.com/neuronale-netzwerke-einfuehrung/>)

Der Unterschied der beiden Netzwerke ist die Art der Wertweitergabe zwischen den Neuronen. Während beim *Feedforward-Network* nur Informationen an die Neuronen der nächsten Schicht weitergegeben werden können, findet beim *Reccurent-Neural-Network* zusätzlich eine Rückkopplung statt, wodurch eine Anpassung an komplexere Daten ermöglicht werden soll. Gleichzeitig erfordert dies aber auch ein Vielfaches an Rechenleistung, da pro Schicht deutlich mehr Rechenoperationen notwendig sind. Konfigurierte Parameter sind hier vor allem die verwendeten Optimierer und Aktivierungsfunktionen die einen Einfluss auf die Anpassung an die Trainingsdaten haben. Außerdem wurde die Größe des Netzwerkes, also Anzahl der Neuronen per Schicht und Anzahl der Schichten variiert, wodurch sich die Komplexität des Netzwerkes und damit auch die Anpassungsfähigkeit ändert. Bei den im nachfolgenden präsentierten Ergebnissen werden *Feedforward-Network* (FNN) sowie *Long-Short-Term-Memory* (LSTM) als Methode aus den *Reccurent-Neural-Networks* dargestellt.

2.2 Extreme Gradient Boosting

Eine andere verwendete Methode ist das *Extreme Gradient Boosting* (XGBoost). Dieses gehört zu den Entscheidungsbäumen und ist ein sogenanntes Ensemble-Verfahren, welches mehrere Entscheidungsbäume (siehe Abbildung 2) zu einem stärkeren Modell kombiniert. Es nutzt dabei *Boosting*, eine Methode des Maschinellen Lernens, um die schwächeren Modelle nacheinander zu verbessern und den Fehler zu minimieren.

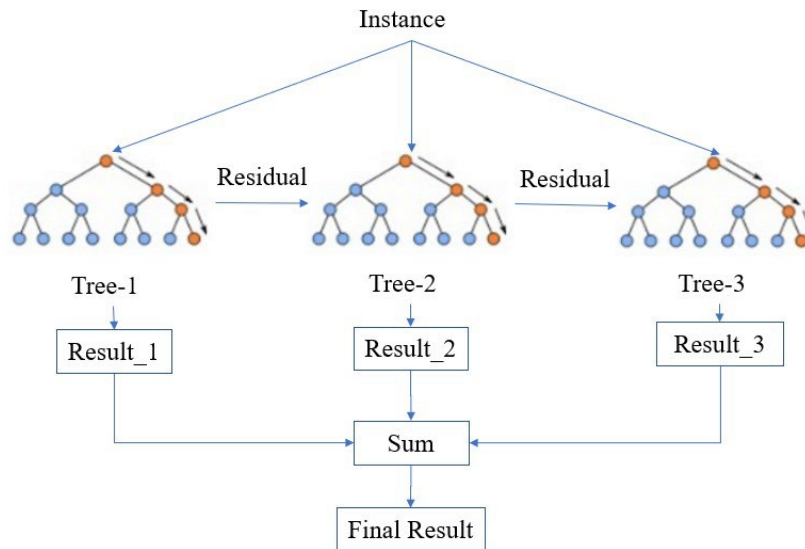


Abbildung 2: XGBoost vereinfacht dargestellt
www.researchgate.net/figure/Simplified-structure-of-XGBoost_fig2_348025909

Die Vorgehensweise von XGBoost ist es, zuerst einen einzelnen Entscheidungsbaum zu erstellen und diesen auf die Daten anzuwenden. Anschließend wird der Fehler der Vorhersage berechnet und eine neue Version des Entscheidungsbaums erstellt, der den Fehler reduziert. Diese Schritte werden wiederholt, wobei in jeder Iteration ein weiterer Entscheidungsbaum hinzugefügt wird. XGBoost verwendet dabei mehrere Techniken, um die Vorhersagegenauigkeit weiter zu verbessern. Dazu gehören beispielsweise die Reduzierung von *Overfitting* (Überanpassung) durch Regularisierung, die Anwendung von Gewichten auf die Trainingsbeispiele und die Verwendung von *Gradienteninformationen*, um die Auswahl der *Split-Punkte* im Entscheidungsbaum zu optimieren. Am Ende werden die einzelnen schwachen Entscheidungsbäume zu einem leistungsfähigeren Ensemble zusammengefügt.

2.3 Gauss Prozess

Der *Gaussian Process* ist ein stochastisches Modell, das die Ungewissheit über eine Funktion modelliert. Diese Methode ist besonders gut geeignet für Regressions- und Klassifikationsaufgaben. *Gaussian Processes* basieren auf der Annahme, dass die Funktion aus einer Gruppe von Funktionen gebildet wird, die durch eine Kovarianzfunktion beschrieben werden kann. Die Kovarianzfunktion bestimmt die Ähnlichkeit zwischen zwei Punkten der Funktion. Die Parameter der Kovarianzfunktion können mithilfe von *Maximum-Likelihood-Schätzung* (MLE) geschätzt werden. Die MLE-Schätzung basiert auf der Idee, die Parameter so zu wählen, dass die Wahrscheinlichkeit der beobachteten Daten maximiert wird. Dies kann jedoch sehr rechenintensiv sein, insbesondere für große Datensätze. Das liegt daran, dass die MLE-Schätzung die inverse der Kovarianzmatrix berechnet. Die inverse der Kovarianzmatrix ist eine Matrix, dessen Größe mit der Komplexität des Datensatzes zunimmt. Um diese Rechenleistung zu minimieren, lässt sich die *Sparse Gaussian Process Regression* einsetzen. Diese Methode zur Verbesserung der Effizienz, basiert auf der Idee, nur einen kleinen Anteil der Trainingsdaten zu verwenden und damit die Funktion zu modellieren.

2.4 Time-Series-Split

Nach der Vorauswahl geeigneter Modelle und der Anpassung der *Hyperparameter* mit dem *Single-Holdout-Verfahren*, wurden die Daten nach dem *Time-Series-Split* aufgeteilt. Diese Art der Kreuzvalidierung ermöglicht es aus einem Datensatz mehrere Datensätze mit einer unterschiedlichen Aufteilung von Trainings-/Validierungsdaten zu erstellen. Hierdurch kann die Anpassungsfähigkeit des Modells erhöht und das Risiko der *Overfitting* reduziert werden. Zusätzlich wird darauf geachtet den

zeitlichen Verlauf zu berücksichtigen, was bei der Zeitreihenprognosen essenziell ist. Dargestellt ist der Time-Series-Split in Abbildung 3. Die Trainingsdaten werden dabei mit jedem *Split* um ein Jahr verlängert, während das anschließende Jahr zur Validierung genutzt wird. Die letzten beiden Jahre der Daten (2014/15) wurden als unabhängige Testdaten zurückgehalten und nur zur Überprüfung der Prognosegüte genutzt, um ausschließen zu können, dass das Modell nur aufgrund von bereits bekannten Daten gute Ergebnisse liefert.

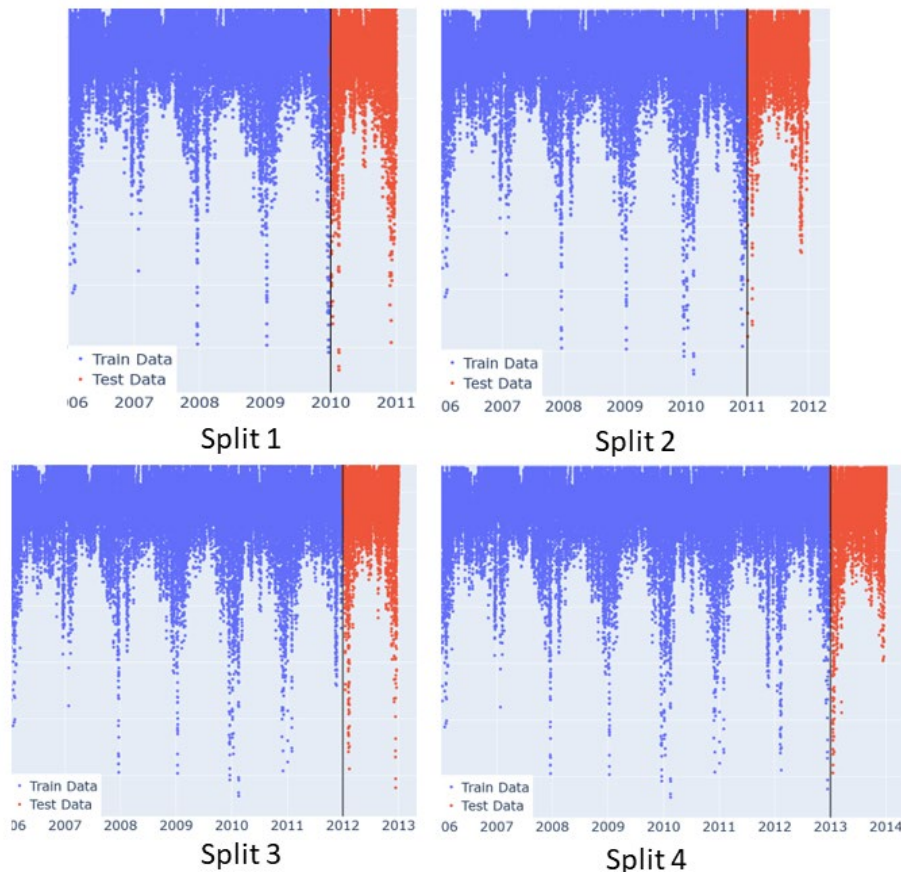


Abbildung 3: Time Series Split der Trainingsdaten

Das Training wurde deutlich verlängert und es fand wiederholt eine Auswahl der besten Modelle statt. Die zwei performantesten Modelle jeder Methode wurden nach einem nochmals verlängerten Training verglichen, mit Ausnahme des spärlichen Gauss Prozesses. An dieser Methode wird noch aktiv gearbeitet, so dass hier nur der MAPE-Wert in der ersten Iteration genannt wird. Die Ergebnisse dieses finalen Trainings werden im folgenden Kapitel dargestellt.

3. Ergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse der verschiedenen Methoden, FFN, LSTM, XGBoost und SGP zusammengetragen und anschließend verglichen. Dabei wird zuerst das Ergebnis der Single-Holdout-Methode mit 100/25 Epochen bei den KNN (FNN und LSTM) bzw. 1500 Entscheidungsbäumen für XGBoost untersucht. Auf Basis dieser Ergebnisse wurden die fünf vielversprechendsten Prognosemodelle ausgewählt. Dargestellt sind die Ergebnisse des *Single-Holdout* in Tabelle 1.

Tabelle 1: Zusammengefasste Ergebnisse des Single-Holdout

Methode	MAPE in %
Feed-Forward-Network	3,46
Long Short-Term Memory	3,32
Extreme Gradient Boosting	2,63
Sparse Gauss Process	5,21

Die Performantesten Modelle wurden im Anschluss mit dem *Time-Series-Split* trainiert. Hierbei wurde die Epochenzahl auf 25 für die KNN gesenkt, da hier durch den TSS vier Datensätze vorliegen und sich so in Summe wieder eine Epochenzahl von 100 ergibt. Die Ergebnisse dieses ersten TSS sind in Tabelle 2 dargestellt. Zu beachten ist, dass es sich hierbei um die erste belastbare Prognosegüte handelt, da der erste Blindtest erst hier durchgeführt wurde.

Tabelle 2: Ergebnisse der Methoden mit Time-Series-Split

Methode	MAPE in %
Feed-Forward-Network	3,56
Long Short-Term Memory	3,74
Extreme Gradient Boosting	2,71

Im Anschluss fand eine weitere Selektion auf nur noch zwei Modelle pro Methode bei den KNN statt. Diese wurden dann mit einer deutlich höheren Epochenzahl von 250 pro Datensatz (bzw. 1000 in Summe) final mit dem TSS trainiert und an den Testdaten evaluiert. Bei der XGBoost Methode wurde aufgrund der sehr kurzen Trainingszeit an nur einem Modell eine manuelle Grid Search durchgeführt. Auch hier fand nun ein erneutes Training mit deutlich erhöhter Anzahl an Entscheidungsbäumen statt, 15.000 statt 1.500. Die finalen Ergebnisse der Prognosegüte sind in Tabelle 3 dargestellt.

Tabelle 3: Finales Ergebnisse nach langem Training mit Time-Series-Split

Methode	MAPE in %
Feed-Forward-Network	3,51
Long Short-Term Memory	3,65
Extreme Gradient Boosting	2,67

Zur Verdeutlichung der Vorhersagequalität wird zusätzlich die Prognose des performantesten Modells (XGBoost) über die zwei Jahre Testdaten (2014 und 2015) in Abbildung 4 und eine Woche aus dem Jahr 2015 in Abbildung 5 dargestellt.

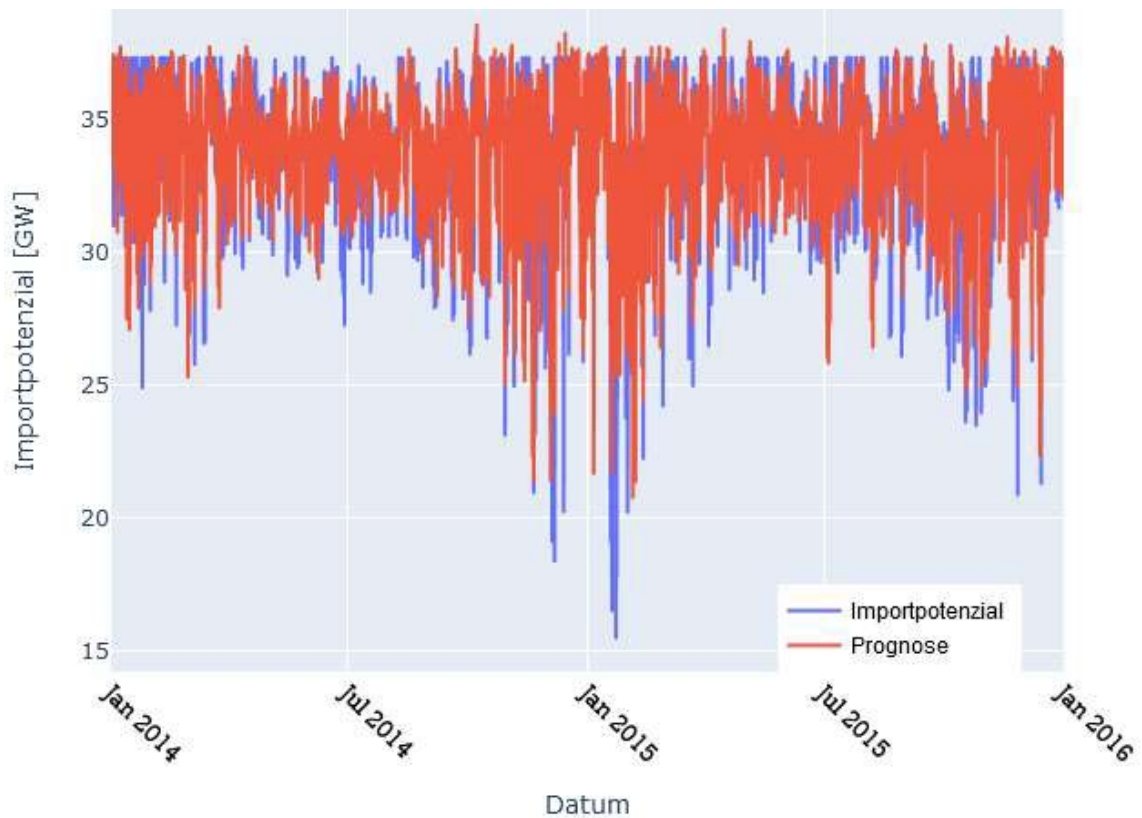


Abbildung 4: Prognose über die beiden Testjahre (2014 und 2015)

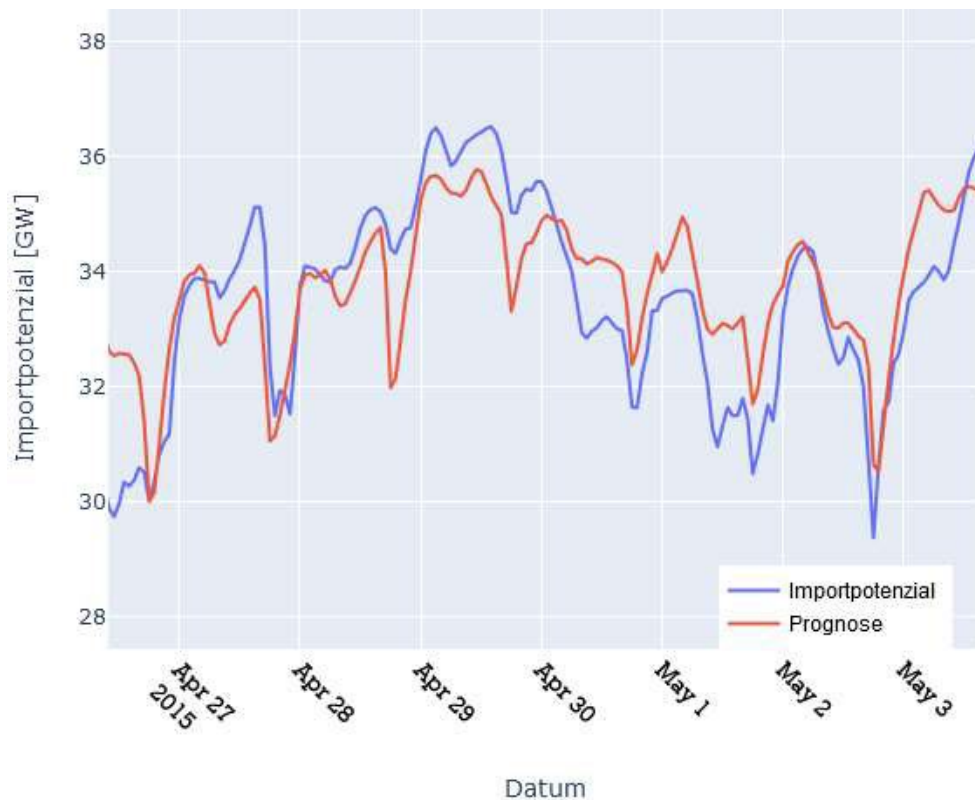


Abbildung 5: Prognose über eine Woche im Jahr 2015 mit Feiertag (1. Mai)

4. Fazit

Die Methode zur Ermittlung von geeigneten Modellen in Kombination mit Variation von Features und Hyperparametern über den *Single-Holdout* hat sich bewährt. Die Modelle, die in dieser ersten Iteration gute Ergebnisse erzielen konnten, konnten sich auch im weiteren Verlauf der Trainings durchsetzen und mit zunehmenden Trainingsepochen eine höhere Prognosegüte erreichen.

Die Verbesserung des MAPE-Werts beim Training mit den *Time-Series-Splits* verdeutlicht, dass diese Art der Kreuzvalidierung sich sehr gut für die Zeitreihenprognose eignet und das Risiko von *Overfitting* effizient reduziert. Zudem ermöglicht es auch bei begrenzten historischen Daten ein erfolgreiches Trainieren des Prognosemodells.

Die Prognosegüte des XGBoost Modells kann mit einem MAPE-Wert von 2,67 % bei stündlicher Prognose über zwei Jahre als präzise bezeichnet werden und zeigt deutlich das Potential des Maschinellen Lernens zur Erstellung von Zeitreihenprognosen. Beim FNN (MAPE von 3,51 %) sind unter Zuhilfenahme eines *Lags* noch Optimierungen denkbar. Dabei wird der zeitliche Betrachtungsraum bei jedem einzelnen Schritt des Trainings auf mehrere Stunden erhöht, wodurch unter Einsatz von mehr Rechenleistung Zusammenhänge von dem Modell besser interpretiert werden können. Das RNN in Form des LSTM erreichte einen MAPE von 3,65 % und schnitt damit erstaunlicherweise schlechter als das einfacher aufgebaute FNN ab. Möglicherweise gibt es auch hier noch Verbesserungspotenzial. Alternativ könnten andere RNN Methoden betrachtet werden. Das SGP besitzt viele Konfigurationsmöglichkeiten, was nach den vorgenommenen ersten Versuchen mit einem MAPE-Wert von 5,2 % ebenfalls noch sehr viel Spielraum zur Optimierung des Modells erahnen lässt.

Implementation and Evaluation of Demand-Side Management using SinkDSM Module in oemof

Abhay Bajaj¹, Amélie Oberdorfer¹, Christoph Schmidt¹

¹ Hochschule Nordhausen, Thuringia

Abstract

This research endeavours to assess the potential and effectiveness of demand-side management (DSM) techniques, with a specific emphasis on a custom SinkDSM module, in the context of the open energy system modelling framework (oemof). The study aims to investigate the functionality of the SinkDSM component and its practical applicability in optimizing electricity consumption within residential sector, with a particular focus on Nordhausen, Thuringia. Employing a Design of Experiment (DoE) approach, the research critically assesses the SinkDSM module within oemof, highlighting its strengths and the effects of various parameters.

1. Introduction

In our quest for climate neutrality, the energy market is undergoing significant reforms, marked by the increasing importance of renewable energy in distributed grids and the introduction of carbon pricing to reduce emissions. However, a major challenge is the intermittent nature of these unconventional energy sources, hindering their smooth integration. Overcoming this challenge requires effective energy management on both the generation (*front-of-the-meter*) and consumer (*behind-the-meter*) sides. The former concentrates on power management, while the latter emphasizes demand management.

Electric Power Research Institute (EPRI) first introduced the term demand-side management (DSM) in the 1980s. DSM has evolved as a set of managerial measures designed to shape and optimize resources on the demand side of the energy equation. This involves strategically influencing and managing load patterns, consumption behaviours, and overall energy usage. DSM encompasses diverse techniques and strategies with the goal of improving the efficiency and reliability of the electricity grid, cutting energy costs, and fostering sustainability by actively involving consumers in adjusting their energy consumption behaviours. The main DSM strategies include demand response (DR) programs, typically initiated by utilities for short-term electricity demand management within periods of 24 to 48 hours. Conversely, Energy Efficiency (EE) initiatives involve long-term endeavours to reduce environmental impacts by promoting energy efficient and sustainable appliances [1].

Torriti et al. [2] undertook an extensive review of DR in Europe, concentrating on policies, programs, and case studies in the UK, Italy, and Spain. Their study emphasized that, during that period, DR initiatives were mainly directed at industries but showed promise for wider engagement in the commercial and household sectors. The research pinpointed historical challenges to DR adoption, such as limited awareness of its energy-saving potential and the initially high costs linked to infrastructure and DR technologies like smart meters, which have since decreased in recent years.

In a review study, Bradley et al. [3] examined the cost-effectiveness and benefits of DR in the UK. Their findings pointed to compelling evidence for achieving reductions in overall electricity consumption and effectively shifting peak demand. The study concluded by highlighting the significance of consumer education on DR technologies and smart appliances. A well-informed consumer base could substantially boost participation in DSM programs, ultimately reducing costs and optimizing benefits.

The literature review highlights the extensive potential of DSM application globally. Stadler and Bukvić-Schäfer [4] assess DSM as a viable solution for addressing grid balancing challenges related to renewable energy integration in Germany. Siddiqui [5] provides a comprehensive review of DSM

application within the US, and Gills [6] conducts a thorough comparative analysis of DSM potential across 40 European countries. These studies collectively underscore the broad applicability and relevance of DSM strategies in various geographical and energy market contexts.

A significant challenge hindering the effective implementation of DSM is the insufficient representation of its intricacies, particularly concerning load-shifting dynamics. Zerrahn and Schill [7] emphasized that a comprehensive representation of DSM goes beyond simply restricting the maximum power available for hourly load shifts. It requires the incorporation of consistent time-related constraints, ensuring that load modifications in one direction are adequately balanced by corresponding changes in the opposite directions within defined timeframes. Overlooking these essential constraints can lead to distorted assessments of DSM's potential utilization and, consequently, results in flawed evaluation of its capabilities and advantages within power systems.

In their study they have identified several models that inadequately incorporate the essential constraints of DSM. For example, Schroeder's work [8] focuses on DSM modelling, primarily involving hourly power restrictions and an overarching energy balance equation spanning the entire timeframe under consideration. However, this approach may lack the comprehensive time-related constraints necessary for an accurate representation of DSM dynamics. Richter's study [9] examines limitations related to both hourly load shifts and the total energy shifted but provides limited details or clarity regarding the practical implementation of these subsets within the timeframe. Similarly, Keane et al. [10] developed a model featuring an energy balance equation with time-based restrictions but does not consider further constraints on the shifting time.

This study investigates the representation of DSM, with a focus on the custom SinkDSM module, within energy system modelling framework (oemof). Specifically, the research explores potential and effectiveness of DSM in optimizing household electricity consumption in Nordhausen, Germany. Through an in-depth examination of residential energy patterns and the integration of renewable energy sources like Photovoltaic (PV) rooftop system, the study develops an illustrative energy system model that incorporates the SinkDSM module. This model serves as a tangible representation demonstrating the practical implementation and evaluation of DSM in a real-world scenario. Employing a Design of Experiment (DoE) approach, the research critically assesses the SinkDSM module within oemof, highlighting its strengths and the effects of various parameters. The research concludes with a detailed analysis of results, offering insights into DSM's impact on energy system costs and the integration of renewable technologies. Overall, the study advances our understanding of DSM, emphasizing its role in enhancing energy efficient and sustainability, particularly in Thuringia's residential sector, and underscores its potential significance in achieving resilient cost-effective, and environmentally friendly energy systems.

2. Custom SinkDSM

The custom SinkDSM module is used to incorporate the DR into the oemof framework. Oemof is an open-source structured framework that integrates diverse tools such as custom SinkDSM for energy system modelling, developed by the interdisciplinary oemof community. Specifically, the oemof.solph package is employed for generating models in energy system modelling and optimization. Oemof's core feature is its use of a robust graph-based framework, implemented through object-oriented programming in the Python language.

The initial implementation of demand response using the custom SinkDSM component was carried out by Endres and Pleßmann [11]. They explored two methodologies: the *delay* approach (influenced by Zerrahn and Schill [7]) and the *interval* approach. A recent addition to the approaches within the custom SinkDSM component is the *DLR* approach, conceptualized by Kochems [12] and based on the research presented in Gill's dissertation [13].

In this research, the custom SinkDSM module is utilized, incorporating the latest *DLR* approach.

Detailed explanations of the parameters crucial for the operational effectiveness of this custom SinkDSM module are covered in the following section.

1. Shift time: This represents the temporal extent during which power has undergone displacement.
2. Delay time: This corresponds to the time duration within which shifted power must be entirely balanced.
3. Capacity up: It is a normalized time series that represents the quantum of power permissible for upward shifts at every discrete time step.
4. Maximum capacity up: The nominal value representing the maximum power that can be shifted up.
5. Capacity down: It is a normalized time series that represents the quantum of power permissible for downward shifts at every discrete time step.
6. Maximum capacity down: The nominal value representing the maximum power that can be shifted down.
7. Demand: It is the normalized load profile prior to the implementation of demand response measures such as *BDEW HO* load profile.
8. Maximum demand: The nominal value representing the maximum demand.
9. Recovery time: It signifies the time duration elapsed prior to the recommencement of the demand response process.

2.1 Modelling Concept

The input data for modelling flexible loads comprises sets and parameters. Parameters provide essential input data related to technology and scenarios, while sets function as indices defining the ranges of parameters, variables, and equations in the optimization framework, such as technologies (X), model nodes (N), and load-shifting classes (H_{DR}). This structured approach enhances the definition of the optimization problem scope and constraints. Flexible loads are represented as electricity storage entities with specific constraints related to storage duration and availability, encompassing variation in charging, and discharging capacity over time, as well as limitation on frequency and duration of utilization. This modelling approach enables a realistic representation of flexible load behaviour within the energy system [13].

In load shifting scenarios, the storage time of DR is limited by the maximum shifting time, represented as $t_{shiftMAX}$. This parameter indicates the latest point in time by which load increases and decreases must be rebalanced. Typically, load shifting provides a certain flexibility regarding the duration before loads need to be rebalanced. This implies that all shifting time (t_{shift}) less than or equal to $t_{shiftMAX}$ are achievable within the given context, as exemplarily illustrated in Fig. 1 [13].

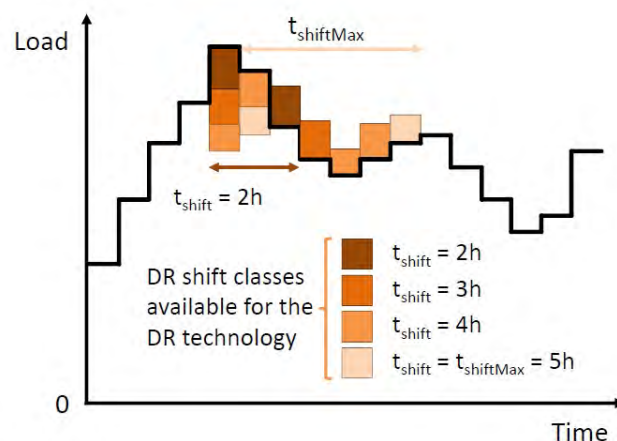


Fig. 1: Illustration of the demand response modelling concept according [13]

The capacity up and capacity down time series represent the power availability for up-shift and down-shift operations, respectively. The determination of power availability for up-shift ($P_{maxUp}(t)$) and down-shift ($P_{maxDo}(t)$) is calculated through the using equation 1 and 2, correspondingly. The quantum of power shifted upwards at time-step t is denoted as $P_{up}(t)$, while its counterpart for down-shift is denoted as $P_{do}(t)$. The constraints on the capacity for up-shift and down-shift are established by equation 3 and 4, respectively. Furthermore, the adjustment in load is formally expressed by equation 5, and the energy balance for the load shifting cycle within t_{shift} is given by equation 6.

$$P_{maxUp}(t) = P_{max}(t) - P(t) \quad (1)$$

$$P_{maxDo}(t) = P(t) - P_{min}(t) \quad (2)$$

$$P_{up}(t) \leq P_{maxUp}(t) \quad (3)$$

$$P_{do}(t) \leq P_{maxDo}(t) \quad (4)$$

$$P_L(t) = P(t) + P_{up}(t) - P_{do}(t) \quad (5)$$

$$\sum P_{up}(t) = \sum P_{do}(t) \quad (6)$$

$P_{max}(t)$ is the maximum demand, $P_{min}(t)$ is the minimum demand, and $P_L(t)$ is the demand after the DR.

3. Developed Model

In this research, an illustrative model has been created to explore the effects of various parameters governing custom SinkDSM module. This module is utilized for integrating flexible load management within the oemof framework. The model is based on a residential household with an annual electrical energy consumption of 3000 kWh. It employs the *BDEW H0* standard load profile as the foundation for electricity demand input. The model considers sources of electrical energy, including grid-procured electricity and in-house electricity generation through PV rooftop systems. The chosen geographical location is Nordhausen, Germany, and thus, the model incorporates the electricity price dynamics and the PV rooftop feed-in profile specific to Nordhausen.

The PV rooftop feed-in profile and investment cost is sourced from the Thuringia Energy System Model developed by Institute for Renewable Energy Technology (in.RET). A synthetic feed-in profile is generated through time-step simulation using the PVSyst software. The irradiance data used is obtained from the Meteororm database, representing the long-term mean irradiance values from 1981 to 2000. The orientation and inclination of rooftop systems depend on the building's geography on which they are installed. The average yield of all possible rooftop systems is calculated and normalized to an average annual irradiance of 915 MWh/MWp and full load hours of 1021 [14].

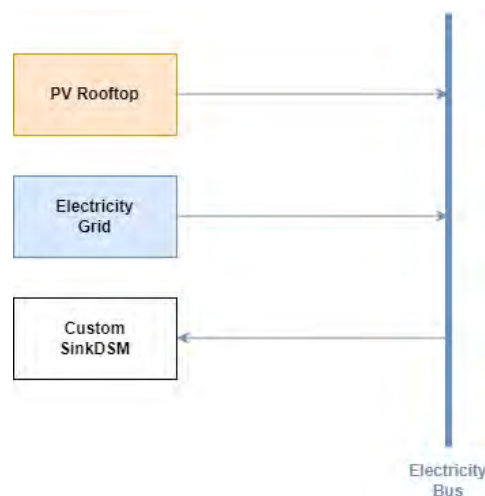


Fig. 2: Schematic illustration of the developed model on oemof

Fig. 2 illustrates the developed model, consisting of two electricity sources (grid electricity import and a PV rooftop system), a custom SinkDSM module, and an electricity bus. The electricity prices from the grid, specific to Nordhausen, is set at 48.63 cents per kWh. Additionally, the cost of PV rooftop system is integrated into the energy system as an investment model. The Engineering, Procurement, and Construction (EPC) cost for the PV rooftop system is calculated using a dedicated function, considering inputs like Capital expenditure (CAPEX) and Operation expenditure (OPEX), payback period, and interest rate. These input values, specified for Nordhausen, are outlined in Tab. 1. The maximum potential for the PV rooftop system is defined as 20 kW, providing flexibility in utilizing PV resources within the oemof framework.

The SinkDSM module’s representation of DR is governed by four key parameters: the time series for capacity up and capacity down, the delay time, and the shift time. For simplicity, this research does not include load shedding and expenses related to DSM, considering the model’s focus on a single household where load shedding and cost consideration of DSM are relatively less significant.

The computation of the capacity up time series, specifically the availability up ($P_{maxUp}(t)$), is determined by equation 1. In this equation, $P(t)$ represents the demand before the demand response, using the *BDEW H0* load profile. Similarly, equation 2 is employed to calculate the availability down ($P_{maxDo}(t)$), where $P_{min}(t)$ represents the minimum value within the *H0* load profile, denoting the essential, unalterable load within a household.

Tab. 1: The input parameters for the calculation of EPC cost

Parameter	Value
CAPEX	800 €/kW
OPEX	3% of CAPEX per annum
Payback period	25 years
Interest rate	10.5%

4. Design of Experiment

Design of Experiment (DoE) is a specialized field within applied statistics that encompasses a structured approach to investigate and understand the influence of input parameters on the one or more response parameters. It empowers researchers to concurrently manipulate several input factors while assessing their impact on a desired output [15].

A full factorial design was devised to evaluate the impact of the custom SinkDSM parameters in this research. This design included four parameters: capacity up time series, capacity down time series, delay time, and shift time. Each parameter was investigated at two distinct levels.

Minitab software was utilized to generate the DoE. This approach allows for a systematic exploration of various parameters combinations and their influence on demand after DR. It aids in gaining a thorough understanding of how these parameters affect the operation of the custom SinkDSM.

Tab. 2: DoE parameters and their levels

Parameters	Levels	
Delay time	24H	48H
Shift time	2H	6H
Capacity up	$0.8 \times P_{max}$	$2 \times P_{max}$
Capacity down	P_{min}	$1.2 \times P_{min}$

Tab. 2 provides a comprehensive overview of the four custom SinkDSM parameters and their respective levels. Notably, the delay time parameter includes two levels: 24 hours and 48 hours. In the first scenario, it indicates that the shifted power must be entirely balanced within the same day, while the second scenario allows for balancing the shifted power within the subsequent day. It is crucial to highlight that both levels represent maximum constraints for delay time, allowing for actual delay times to be less than or equal to the specified values. This flexibility enables the exploration of diverse operational scenarios within the custom SinkDSM module.

Similarly, the shift time parameter exhibits two distinctive levels: 2 hours and 6 hours. These levels represent the maximum limits for shift time, indicating that power can be shifted for a duration less than or equal to the specified values. For instance, in the case of 6 hours shift time, it's possible to shift power for 1, 2, 3, 4, 5, or 6 hours, providing a range of operational scenarios within these defined bounds. This adaptability enables a thorough exploration of shift time dynamics within the custom SinkDSM module.

Concerning the capacity up parameter, the two levels considered involves a 20% reduction in the maximum load of the $H0$ load profile (i.e., $0.8xP_{max}$) and a 100% increment in the maximum load (i.e., $2xP_{max}$). Subsequently, these levels were employed instead of P_{max} in equation 1 to compute the capacity up time series. The decision to reduce the maximum load by 20% was made with the aim of bringing the load profile into closer alignment with the base load and alleviating peak load conditions. This reduction seeks to simulate scenarios where the DSM measures are implemented to smooth out spikes in demand. On the contrary, the choice of a 100% increase in the maximum load was made to explore the potential utilization of the PV rooftop system. This level allows for the exploration of scenarios where the PV rooftop system can significantly contribute to meeting increased demands.

Regarding the capacity down parameter, two levels are defined as the minimum load of the $H0$ load profile (i.e., P_{min}) and a 20% increment in the minimum load ($1.2xP_{min}$). Consequently, P_{min} was replaced by $1.2xP_{min}$ in equation 2 to calculate the capacity down time series in the latter case. The minimum load level represents the fixed load of the household, reflecting scenarios where the household operates with no occupants, and the load mainly originates from appliances that cannot be switched off, such as internet routers and refrigerators. In the second scenario, a 20% increment in the minimum load is introduced to accommodate expected increases in electricity consumption. These increases are anticipated due to the growing prevalence of smart devices and the transition from oil-based technologies to electrical technologies. Examples of this transition include the shift from oil boilers to electric heaters and the adoption of electric vehicles, E-bikes, and E-scooters, all contributing to higher electrical demands in the future.

Tab. 3 provides a comprehensive overview of the DoE generated through the utilization of Minitab software in this research. This full factorial DoE comprises four parameters, each featuring two levels, resulting in a total of 16 simulation runs encompassing diverse parameter and level combinations. For each of these unique parametric settings, the developed energy system model underwent simulation. The objective was to optimize the cost associated with the system. The cost assessment considered both the electricity imported from the grid and the utilization of the PV rooftop system. Consequently, the cost of the system, in conjunction with the outcomes of power shifting through DR and PV rooftop system utilization, was computed for every simulation run within the DoE.

This thorough analysis yields valuable insights into the cost-effective operation of the energy system under various parameter settings. The results of this analysis are extensively discussed in the subsequent section, providing a detailed examination of the findings and their implications. This discussion offers insights into the implications of different parameter combinations on the cost and operational efficiency of the energy system, contributing to a deeper understanding of the research's outcomes.

Tab. 3: Design of Experiment

Run	Delay Time	Shift Time	Capacity up	Capacity down
1	24	6	0.8	1
2	24	6	2	1.2
3	48	6	2	1
4	48	6	2	1.2
5	24	2	2	1
6	24	2	0.8	1
7	24	2	0.8	1.2
8	48	2	0.8	1
9	48	2	2	1
10	48	2	2	1.2
11	24	6	2	1
12	48	2	0.8	1.2
13	48	6	0.8	1.2
14	24	2	2	1.2
15	48	6	0.8	1
16	24	6	0.8	1.2

5. Results and Discussion

The resulting DoE comprised a total of 16 simulation runs, investigating a diverse range of parameters and level combinations. For each unique parametric settings within these simulation runs, a detailed analysis was conducted. This analysis encompassed the computation of the energy system cost, incorporating electricity import cost, the EPC cost of the PV rooftop system, and the utilization of PV rooftop system in the energy system model. Additionally, the amount of power shifted using DR techniques was quantified. The comprehensive results of these analyses are presented in Tab. 4, shedding light on the system's performance under various parameters settings and providing valuable insights for optimization and decision-making.

However, for the sake of an in-depth comparative analysis, the developed model was also simulated without the DSM component. Instead, a generic sink component, using the *H0* household load profile as input was employed. Under this scenario, the cost of the energy system was reported 1281.31 euros per annum, and the PV utilization stands at 452.63 kWh. In the following subsection, a detailed comparison of cost, PV utilization, and power shift has been discussed.

5.1 Comparison of cost

The implementation of DSM yields annual saving of at least 3.26% compared to the scenario without DSM. In the case of run 3 where the cost of the energy system with DSM is 1009.58 euros annually. This indicates a remarkable decrease of 21.21% when compared the cost of the energy system model without the DSM implementation. This substantial reduction in cost is attributed to the increased utilization of PV, which proves to be more cost-effective. These findings underscore the cost-effective and efficiency gains associated with the incorporation of DR measure within the energy system.

The graph in Fig. 3 illustrates the impact of SinkDSM component parameters on the energy system's cost. The capacity up time series parameter significantly influences cost reduction, showing a consistent decline in system cost with increased capacity up time series. A comparison between the simulation run 15 and 3, where only the capacity up time series parameter is varied, demonstrates a

substantial 22.78% decrease in system cost when increasing the capacity up time series. In contrast, the effects of capacity down and delay time on cost are relatively negligible. However, a notable cost increase of 8.12% to 8.69% is observed when shift time decreases from 6 hours to 2 hours, particularly noticeable when the capacity up is maximized ($2xP_{max}$). This emphasizes the importance of carefully considering the shift time parameter in scenarios with maximized capacity up.

Tab. 4: Energy system model result for each simulation run

Run	Delay Time	Shift Time	Capacity up	Capacity down	Cost	Power Shifted	PV Utilization
1	24	6	0.8	1	1239.54	130.33	570.87
2	24	6	2	1.2	1036.85	312.93	1144.66
3	48	6	2	1	1009.58	369.21	1221.84
4	48	6	2	1.2	1023.83	330	1181.51
5	24	2	2	1	1108.09	232.41	942.98
6	24	2	0.8	1	1239.54	128.14	570.87
7	24	2	0.8	1.2	1239.54	326.34	570.87
8	48	2	0.8	1	1239.54	130.81	570.87
9	48	2	2	1	1108.09	232.43	952.99
10	48	2	2	1.2	1110.56	213.69	935.98
11	24	6	2	1	1018.08	355.64	1197.78
12	48	2	0.8	1.2	1239.54	314.78	570.87
13	48	6	0.8	1.2	1239.54	483.98	570.87
14	24	2	2	1.2	1110.56	218.69	935.99
15	48	6	0.8	1	1239.54	132.54	570.87
16	24	6	0.8	1.2	1239.54	516.93	570.87

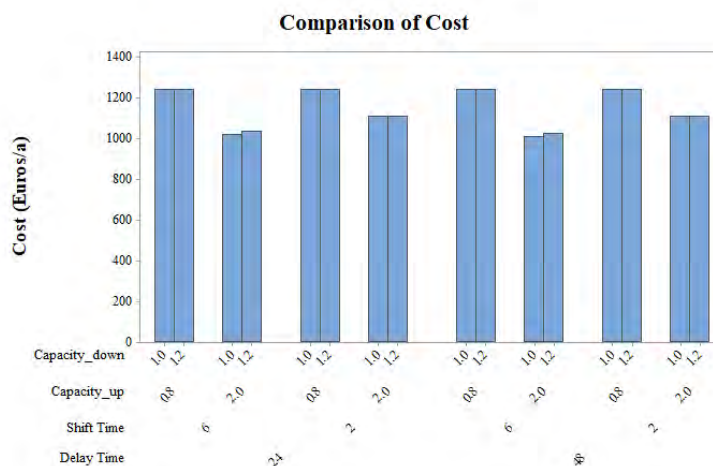


Fig. 3: Effects of SinkDSM parameters on the cost of energy system

5.2 Comparison of power shift

The graph illustrated in the Fig. 4 compares the power shift achieved by the custom SinkDSM component at various parametric settings. Several key observations can be made from this graph:

1. Power shift consistently reaches at its minimum when both the capacity up and capacity down parameters are minimized, specifically $0.8xP_{max}$ and P_{min} , respectively.

2. A notable increase in power shift occurs when the capacity up is minimized ($0.8xP_{max}$) and the capacity down parameter changes from P_{min} to $1.2xP_{min}$. This indicates that reducing the capacity down can significantly improve power shift, especially in situations with limited capacity up.
3. In contrast, when the capacity up is maximized ($2xP_{max}$), the rise in power shift is less noticeable as the capacity down parameter changes from P_{min} to $1.2xP_{min}$. In this scenario, the effect on power shift is relatively modest compared to situations with lower capacity up.
4. Altering the shift time from 6 hours to 2 hours, while maintaining other parameters constant, results in either no change or decrease in power shift, ranging from 30% to 37%. This implies that a shorter shift time constraint may hinder the efficacy of DR, causing less power to be shifted to other time intervals within the specified 2-hour window.
5. Adjusting the delay time from 24 hours to 48 hours, with other parameters held constant, leads to only a marginal alteration in power shift. This indicates that, within the specified range, the delay time parameter has a relatively minor impact on the overall power shift achieved by the custom SinkDSM component. Other factors, such as capacity up and capacity down, seem to exert a more substantial influence on the system's power shift performance.

Furthermore, in simulation run 1 and 16, where only the capacity down parameter is adjusted from P_{min} to $1.2xP_{min}$ while keeping other parameters constant, there is a notable increment of 296.6% in power shift. This increase is remarkable, especially considering both the cost and PV output are at their extreme values in these runs, as indicated in Tab. 4.

These findings underscore the intricate relationship between parameters and power shift within the custom SinkDSM component. While specific parameter configurations may optimize power shift, they may not necessarily result in cost-effective or PV-utilization-optimized outcomes. Achieving a balance among these factors is crucial when optimizing the overall performance of the energy system.

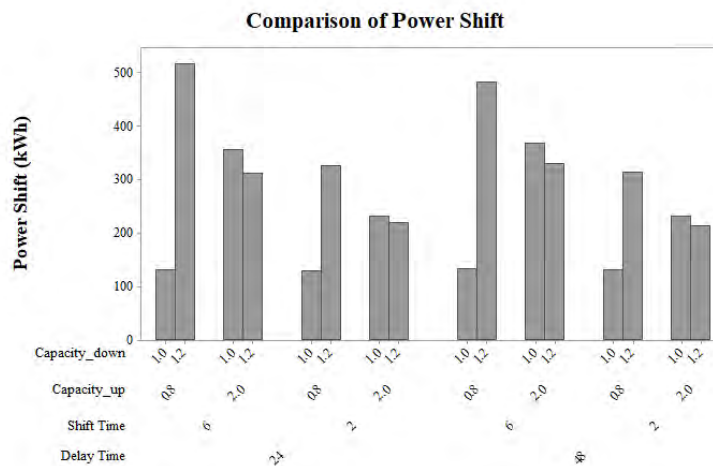


Fig. 4: Effects of SinkDSM parameters on the power shift

5.3 Comparison of PV output

The comparison of PV output across different parametric settings is illustrated in Fig. 5. The key trends that can be observed are listed below:

1. The utilization of PV has been consistently at its lowest when the capacity up is minimized.
2. Significantly, there is a substantial increase in PV utilization when the capacity up parameter changes from $0.8xP_{max}$ to $2xP_{max}$. This increase in PV utilization ranges from 63.95% to

114.03%. These findings highlight the significant influence of the capacity up time series on PV utilization. Increasing the capacity up times series leads to significantly higher PV output.

3. Contrastingly, when the capacity down parameter changes from its lower level to its higher level while keeping the capacity up maximized, there is a slight decrease in PV utilization. This decrease ranges between 0.74% to 4.43%. These observations suggest that variations in capacity down have a relatively minor impact on PV utilization when capacity up is already maximized.
4. Altering the shift time from 6 hours to 2 hours, with other parameters constant and capacity up at its higher level, leads to a reduction in PV utilization ranging between 18.23% to 22%. This reduction underscores the trade-off between load-shifting flexibility and the utilization of renewable energy sources like PV. A shorter shift time constraint may hinder the system's capacity to synchronize electricity consumption of PV generation availability, resulting in reduced PV output.

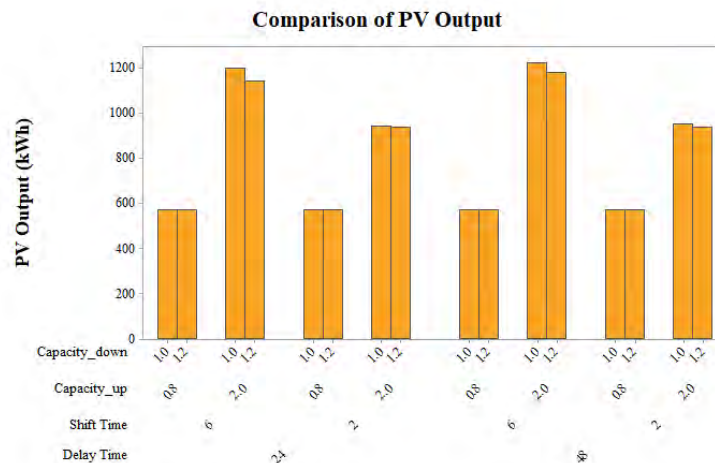


Fig. 5: Effects of SinkDSM parameters on the PV utilization

To summarize, the capacity up time series parameter significantly influences PV utilization, with higher values correlating to substantially greater PV output. Variations in capacity down and delay time have a relatively minor impact on PV output when capacity up is maximized. These insights underscore the crucial role of parameter settings in optimizing PV utilization within the energy system.

The graph illustrated in Fig. 6 provides a comprehensive overview by combining the comparison of cost, power shift, and PV utilization for each simulation run. Several key observations can be made:

1. Simulation run 3 emerges as the optimal parametric configuration, showcasing the lowest cost the energy system, maximum PV utilization, and commendable power shift performance. It represents a well-balanced solution that optimizes multiple system objectives.
2. Simulation runs 1, 6, 8, and 15 are identified as the least performing configurations due to their low power shift and PV utilization, along with high system costs. These runs share the characteristic of having both capacity up and capacity down time series parameters set to their lower levels.
3. Simulation run 16 stands as a unique case where power shift is maximized, yet it results in the maximum cost for the energy system and the minimum PV utilization.

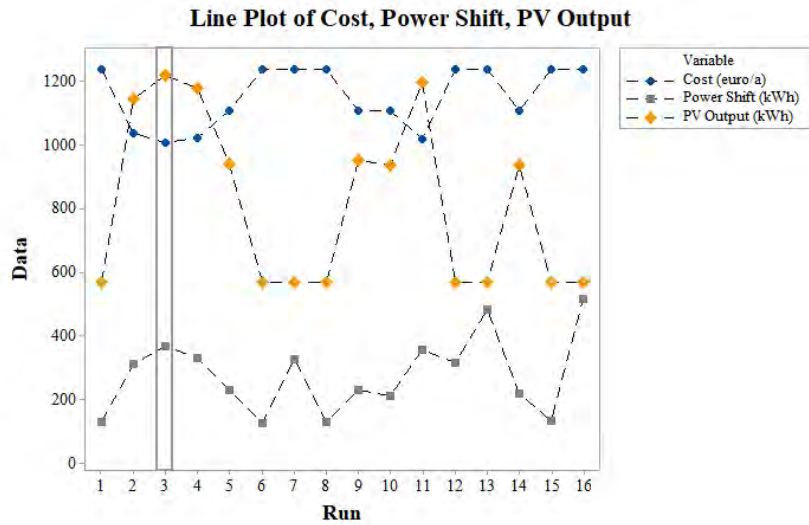


Fig. 6: Combined comparison of cost, power shift, and PV utilization

Considering the notable influence of simulation runs 3 and 16, the subsequent section will thoroughly compare these two scenarios concerning post-DR demand, providing additional insights into their performance and trade-offs.

5.4 Comparison of post-DR demand

The parametric settings of run 3 includes 48 hours delay time, 6 hours shift time, capacity up at $2xP_{max}$, and capacity down at P_{min} . On the other hand, run 16 features 24 hours delay time, 6 hours shift time, capacity up at $0.8xP_{max}$, and capacity down at $1.2xP_{min}$.

In order to provide a detailed understanding of these configurations, time series plots have been generated for the $H0$ load profile, capacity up, and capacity down. These plots cover both a summer week (Fig. 7(a) and Fig. 8(a)) and a winter week (Fig. 7(b) and Fig. 8(b)), providing a visual representation of how these parameters influence DR in different seasons.

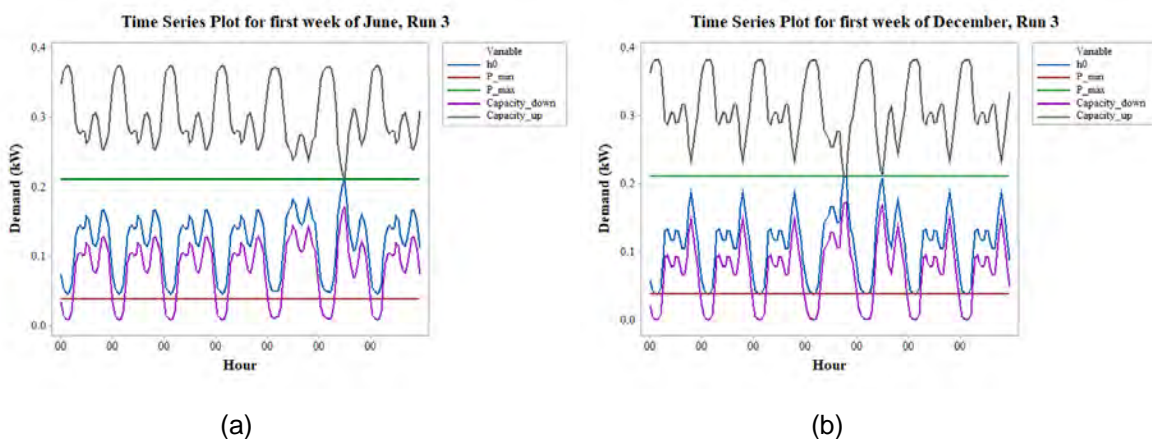


Fig. 7: Time series plot of $H0$, capacity up and capacity down time series for run 3 (a) First week of June (b) First week of December

It is crucial to highlight that across all simulation runs, the annual electricity consumption of the household is consistent at 3000 kWh. The SinkDSM component has the capability to augment electricity consumption at one time step, necessitating a compensatory reduction in load at another time step. For a comparative analysis of the demand after the DR in these two simulations runs,

please refer to Fig. 9 and Fig. 10. These plots offer insights into how these parameter configurations influence demand after DR.

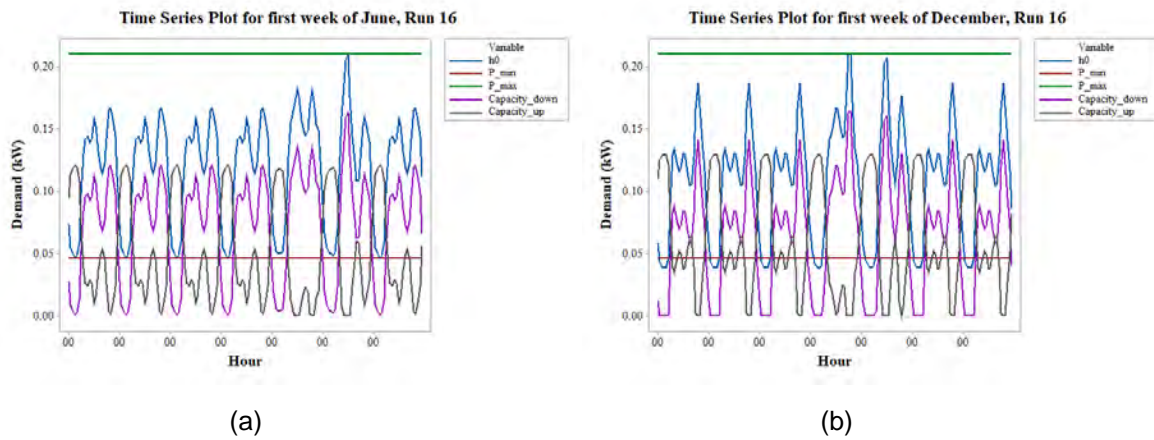


Fig. 8: Time series plot of H0, capacity up and capacity down time series for run 16 (a) First week of June (b) First week of December

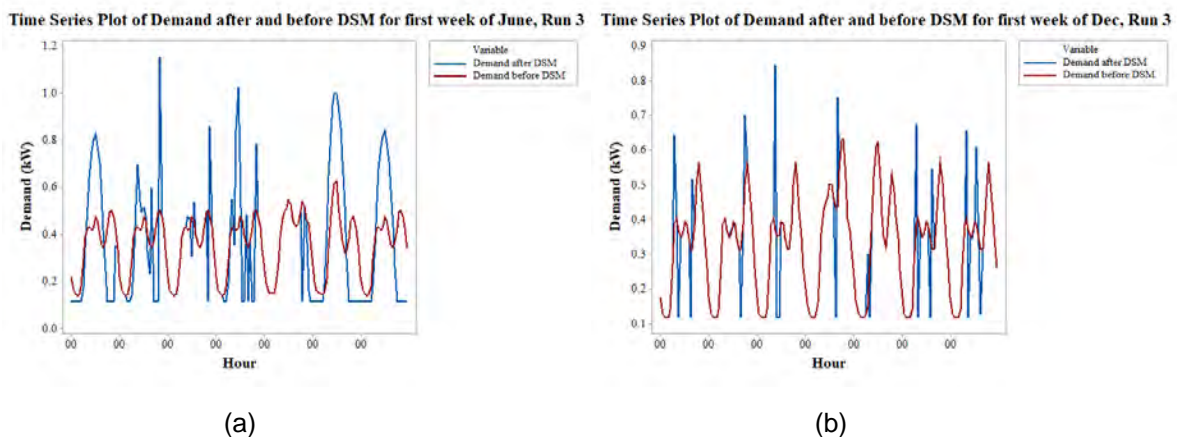


Fig. 9: Time series plot of demand after and before DR for run 3 (a) First week of June (b) First week of December

As discussed earlier, run 3 presents considerable possibilities for increasing electricity consumption, evident in Fig. 9, where the demand post-DR shows pronounced spikes compared to the pre-DR demand. This heightened electricity consumption has been adeptly counterbalanced by reducing the load at other time steps within the specified 48 hours delay time.

The several key observations can be made when comparing the demand after DR curves for both the summer week (Fig. 9(a)) and winter week (Fig. 9(b)):

1. The peak load during the summer week is significantly higher than that in the winter week, approximately 35% higher. This contrast arises from the increased availability of PV generation during the summer, enabling the SinkDSM component to leverage more PV utilization for demand response.
2. The demand response in run 3 showcases its effectiveness in utilizing surplus PV during the summer, leading to elevated peak loads and more pronounced spikes in electricity consumption.

These observations underscore how the SinkDSM module can enhance demand by capitalizing on seasonal variations in PV generation, ultimately maximizing the use of renewable energy sources.

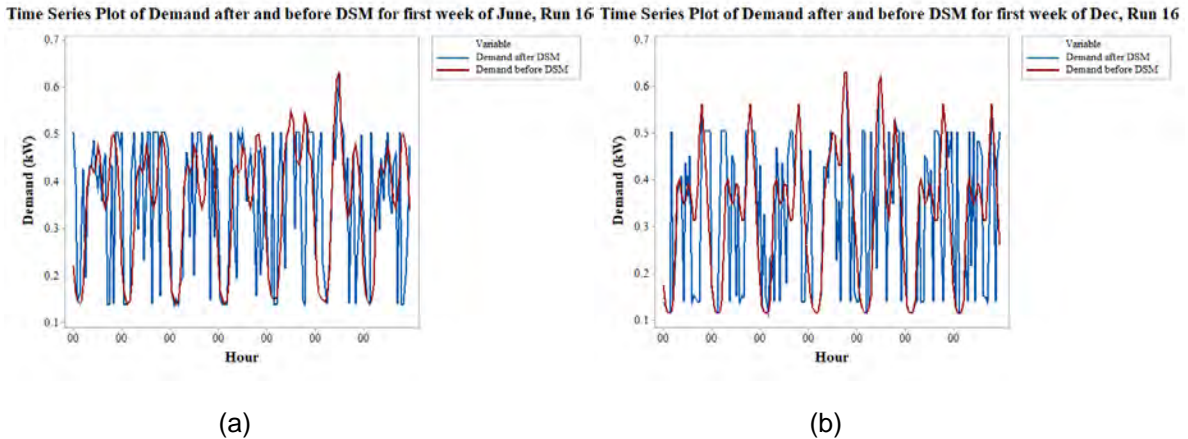


Fig. 10: Time series plot of demand after and before DR for run 16 (a) First week of June (b) First week of December

Contrastingly, in run 16, where the capacity up is minimized, there is limited capacity to increase the load. Consequently, PV utilization decreases by 53.28% compared to run 3. Nevertheless, there is a 40% increase in power shift, indicating a primary focus on shifting power consumption. This shift in focus toward power shifting is evident when analyzing the demand curves in Fig. 10 for both summer and winter weeks. Key observations include:

1. The demand after DR in run 16 effectively fills the valley load, the lower portion of the demand curve, and mitigates the peak load compared to the demand before DR.
2. Despite lower PV utilization in run 16 due to constrained capacity up, the SinkDSM component effectively optimizes load profiles by redistributing electricity consumption, leading to a more balanced and efficient use of energy resources.

These findings underscore how diverse parameter settings within the SinkDSM component can result in distinct strategies for DR. This includes a focus on increasing renewable energy sources integration or power shifting for load optimization, depending on the system's constraints and objectives.

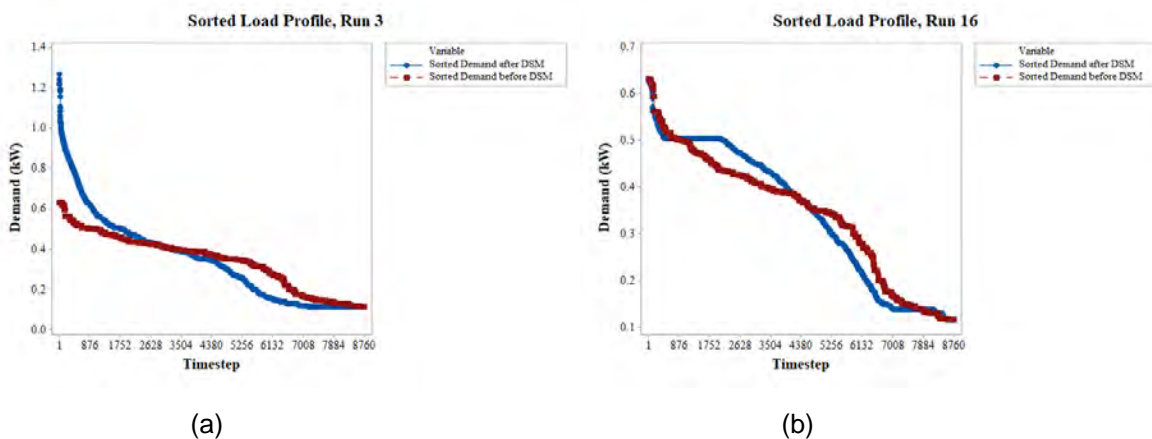


Fig. 11: Sorted load profile of demand after and before DR for (a) run 3 (b) run 16

Fig. 11 present sorted load profiles for demands after and before DR, offering an alternative perspective on peak values within the demand profiles. Key observations include:

For Run 3:

1. The sorted load profile of demand after DR reveals a greater number of peaks and valleys compared to the load profile before DR. This increased variability is a consequence of having capacity up at its higher level, providing more flexibility in load optimization.
2. Consequently, the peaks in the demand after DR profile deviate more significantly from the mean demand, showcasing the SinkDSM component's capability to achieve heightened load fluctuations.

For Run 16:

1. Conversely, the sorted load profile of demand after DR in Run 16 exhibits fewer peaks and valleys in comparison to the load profile before DR. This reduction is attributed to the constraints of having capacity up at its lower level and capacity down at its higher level.
2. The peaks and valleys in the demand after DR profile are closer to the mean demand, signaling a more restrained DR strategy, where demand fluctuations are less pronounced.

These observations underscore how diverse parameter configurations within the SinkDSM component can influence the distribution of peaks and valleys in demand profiles, thereby impacting load variability and overall system behavior.

5.5 Comparison of electricity import

As mentioned earlier, run 3 demonstrates significant PV utilization owing to its specific parameter configuration, as depicted in Fig. 12. This time series plot illustrates the interplay between grid electricity import and in-house electricity generation from the PV rooftop system. In the summer week, there is a distinct utilization of PV, leading to a decreased dependence on grid electricity, as evidenced in Fig. 12(a).

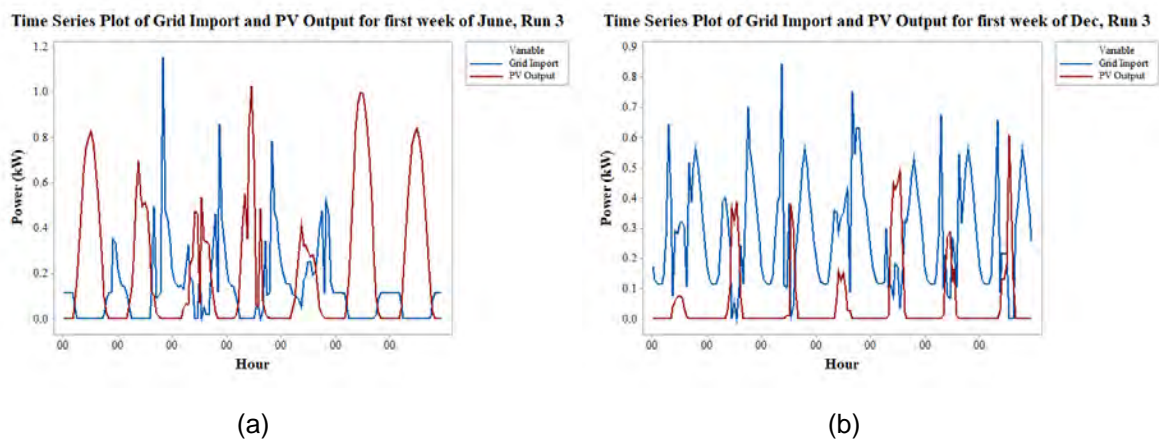


Fig. 12: Time series plot of grid electricity import and PV output for run 3 (a) First week of June (b) First week of December

In contrast, run 16 encounters limited PV utilization, as depicted in Fig. 13, resulting in a 36.06% surge in grid electricity imports compared to run 3. Moreover, run 16 showcases pronounced fluctuations in the demand profile, primarily attributed to power shifts executed by the SinkDSM component. These insights underscore how the specific settings within the SinkDSM component can notably influence the integration of renewable energy sources, the dependence on grid electricity, and the overall stability.

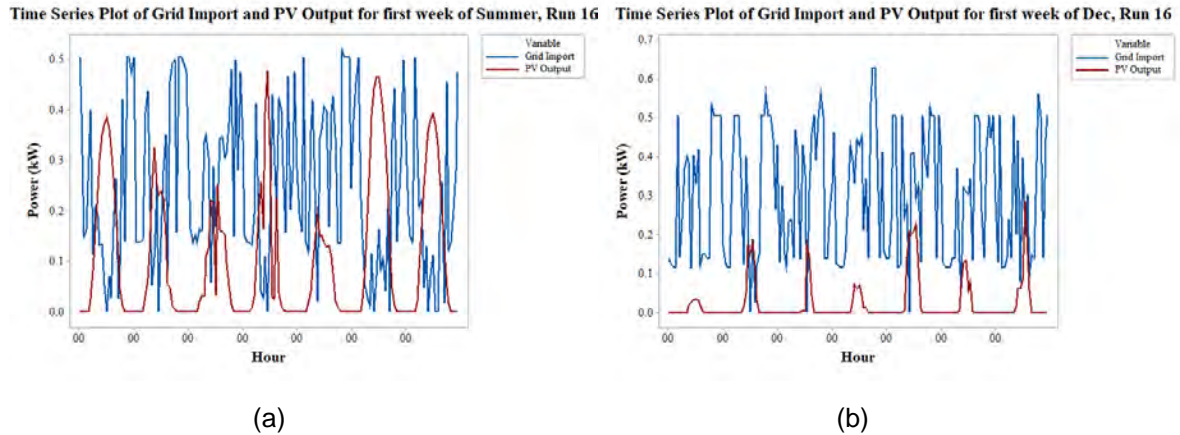


Fig. 13: Time series plot of grid electricity import and PV output for run 16 (a) First week of June (b) First week of December

6. Conclusion

This research focuses on integrating DSM, particularly through the custom SinkDSM module, into the oemof. It assesses the potential and effectiveness of DSM in optimizing household electricity consumption in Nordhausen, Germany. Using an illustrative energy system model that incorporates residential energy patterns and a PV rooftop system, the research practically implements and evaluates DSM in a real-world scenario. Employing a DoE approach, the study critically assesses the SinkDSM module within oemof, highlighting its strengths and the impacts of various parameters. The research has yielded several key findings that shed light on the potential of DSM techniques within energy systems.

The custom SinkDSM module showcased notable cost reductions in the energy system, ranging from 3.26% to a substantial 21.21%, depending on parameter settings. This highlights the economic advantages of incorporating flexible DR capabilities through DSM strategies in energy systems. There is a remarkable increase in PV utilization, ranging from 26.12% to an impressive 169.94%, compared to an energy system model without DSM. This emphasizes the potential for optimizing the utilization of renewable energy sources through effective DR techniques. The custom SinkDSM module adeptly shifts electricity consumption through DR techniques. The shifted electricity consumption ranges from 128.14 kWh to 516 kWh, showcasing the module's efficacy in optimizing energy consumption patterns.

Implementing a comprehensive DoE approach, we have identified the optimal configuration for our custom SinkDSM module. Specifically, run 3, characterized by a 48-hour delay time, a 6-hour shift time, a capacity up time series calculated using $2xP_{max}$ in equation 1, and a capacity down time series calculated using P_{min} in equation 2, stands out as the most effective configuration. This setup demonstrates exceptional capabilities in simultaneously reducing overall system costs and maximizing PV utilization within a single household with an annual electricity consumption of 3000 kWh.

The research emphasizes the critical role of capacity up and capacity down time series as the most influential parameters within the custom SinkDSM module. These time series dictate the availability of power that can be shifted either up or down, and their effective management is paramount for achieving desired outcomes. The findings indicate that shift time is a crucial determinant of system performance. Extending the shift time contributes to cost reduction, increased PV utilization, and improved power shift capabilities. Conversely, shorter shift times are linked to reduced PV utilization (18.23% to 22%) and diminished power shift (30% to 37%). The selection of shift time should align with specific system objectives and the aim of optimizing renewable energy utilization. Delay time, despite being a crucial parameter in DR, has minimal impact on system cost, PV utilization, and power shift. This implies that variations in delay time within the studied range do not exert a significant

influence on the overall performance of the system.

In conclusion, our study affirms that the custom SinkDSM module holds significant promise for effectively representing DSM within the oemof framework. However, it is crucial to acknowledge that obtaining precise data for parameters such as capacity up and capacity down time series may pose challenges, demanding meticulous attention to faithfully replicate real-world conditions. The module showcases versatility, addressing diverse objectives, whether the focus is on cost reduction through DR, integrating renewable energy sources, or a combination of both strategies.

7. References

- [1] V. S. K. Murthy Balijepalli, V. Pradhan, S. A. Khaparde and R. M. Shereef, "Review of demand response under smart grid paradigm," ISGT, India, (2011), pp. 236-243, doi: 10.1109/ISET-India.2011.6145388.
- [2] Torriti, Jacopo, Mohamed G. Hassan, and Matthew Leach. "Demand response experience in Europe: Policies, programmes and implementation." *Energy* 35.4 (2010): 1575-1583.
- [3] Bradley, Peter, Matthew Leach, and Jacopo Torriti. "A review of the costs and benefits of demand response for electricity in the UK." *Energy Policy* 52 (2013): 312-327.
- [4] Stadler, Ingo, and Aleksandra Saša Bukvić-Schäfer. "Demand side management as a solution for the balancing problem of distributed generation with high penetration of renewable energy sources." *International Journal of Sustainable Energy* 23.4 (2003): 157-167.
- [5] Siddiqui, O. "Assessment of achievable potential from energy efficiency and demand response programs in the US (2010–2030)." Electric Power and Research Institute, January (2009): 2010-2030.
- [6] Gils, Hans Christian. "Assessment of the theoretical demand response potential in Europe." *Energy* 67 (2014): 1-18.
- [7] Zerrahn, Alexander, and Wolf-Peter Schill. "On the representation of demand-side management in power system models." *Energy* 84 (2015): 840-845.
- [8] Schroeder, Andreas. "Modeling storage and demand management in power distribution grids." *Applied Energy* 88.12 (2011): 4700-4712.
- [9] Richter, Jan. DIMENSION-a dispatch and investment model for European electricity markets. No. 11/03. EWI working paper, 2011.
- [10] Keane, Andrew, et al. "Demand side resource operation on the Irish power system with high wind power penetration." *Energy Policy* 39.5 (2011): 2925-2934.
- [11] Endres, Julian, and Plessmann, Guido. "Features/#622 Dsm Custom Component by Nailend · Pull Request #632 · Oemof/Oemof-solph." GitHub, github.com/oemof/oemof-solph/pull/632.
- [12] Kochems, Johannes: Demand response modeling in oemof.solph. https://github.com/jokochems/DR_modeling_tutorial.git. Version: 2021
- [13] Gils, Hans Christian. "Balancing of intermittent renewable power generation by demand response and thermal energy storage." (2015).
- [14] Forschungsdaten zum Energiesystemmodell Thüringen, doi: 10.22032/dbt.53108. Version: Oct 2021
- [15] Bower, Keith M.: Design of Experiments. <https://asq.org/quality-resources/design-of-experiments>. Version: 2023

Learning by Doing – Gelingende Bildung für nachhaltige Entwicklung mit problemorientierten und situierten Lehr-Lern-Arrangements

Bettina Hollstein

Max-Weber-Kolleg, Universität Erfurt, Erfurt

Abstract

Das Konzept der nachhaltigen Entwicklung wurde in Form von 17 Sustainable Development Goals (SDGs) durch die UN konkretisiert. Das vierte Ziel, "Hochwertige Bildung" enthält das Unterziel 4.7: "Bis 2030 sicherstellen, dass alle Lernenden die für nachhaltige Entwicklung notwendigen Kenntnisse und Fähigkeiten erwerben, unter anderem durch Bildung für nachhaltige Entwicklung". Damit kommt Hochschulen eine zentrale Rolle bei der Ermöglichung der SDGs zu, denn Bildung für nachhaltige Entwicklung (BNE) ist nicht nur ein Ziel, sondern auch ein Mittel, mit dem die anderen SDGs erreicht werden sollen. In diesem Beitrag werden erste Ergebnisse aus dem Teilprojekt der Universität Erfurt „Bildung für nachhaltige Entwicklung“ (BNE) des KLIMA-Netzwerks für Thüringen vorgestellt. Konzeptionelle Überlegungen aus der pragmatistischen Bildungstheorie, speziell von John Dewey, werden empirische Ergebnisse aus Befragungen von Studierenden, Praxispartnern und Lehrenden gegenübergestellt, um gelingende BNE zu konkretisieren.

1. Einleitung

Angesichts der globalen ökologischen und sozialen Herausforderungen, die das Wohlergehen und Überleben der Menschheit auf der Erde bedrohen, wurde das Konzept der nachhaltigen Entwicklung in Form von 17 Zielen für nachhaltige Entwicklung (Sustainable Development Goals, SDGs) im Jahr 2015 durch die UN konkretisiert (UN Goals o. J.). Nachhaltige Entwicklung ist dabei nicht auf Umweltfragen beschränkt, sondern umfasst alle Aspekte eines guten Lebens: sowohl intragenerationelle Gerechtigkeit als auch intergenerationelle Gerechtigkeit (Ekardt 2010), wie man an den unten aufgeführten Zielen sieht, die sowohl Aspekte der Ökologie (z. B. Life on Land), des Sozialen (z. B. Good Health and Well-Being) und des Ökonomischen (z. B. Responsible Consumption and Production) berücksichtigen (s. Abb. 1).

Nicht alle der 17 SDGs lassen sich ohne Weiteres konsistent gleichzeitig bearbeiten. Beispielsweise kommt ein Ziel wie "Decent Work and Economic Growth" leicht in Konflikt mit „Climate Action“, so dass die jeweilige Situation, in der die Ziele zur Anwendung gebracht werden sollen, genau betrachtet werden muss. Während also die jeweilige Bedeutung und Wichtigkeit konkurrierender Ziele in verschiedenen Kontexten umstritten ist, ist das vierte Ziel, "Quality Education", mehr oder weniger unumstritten, da es die Ermöglichung der anderen Ziele leisten soll. Innerhalb dieses Ziels heißt es im Unterziel 4.7: "Bis 2030 sicherstellen, dass alle Lernenden die für nachhaltige Entwicklung notwendigen Kenntnisse und Fähigkeiten erwerben, unter anderem durch Bildung für nachhaltige Entwicklung" (UNESCO BNE o. J.). Bildungseinrichtungen spielen bei der Vermittlung von Bildung für nachhaltige Entwicklung (BNE) eine wichtige Rolle. Denn BNE ist nicht nur ein Ziel, sondern auch ein Mittel, mit dem eine nachhaltige Entwicklung erreicht werden soll.

In diesem Beitrag werden Hochschulen als Bildungsinstitutionen in den Fokus genommen, konkret geht es darum, Gelingensbedingungen für eine gute BNE in der Hochschulbildung zu ermitteln (Hoch N 2020). Als Grundlage dienen in theoretischer Hinsicht pragmatistische Erkenntnisse der Bildungstheorie von John Dewey und in empirischer Hinsicht die Forschungsergebnisse, die im Teilprojekt der Universität Erfurt zum Thema „Bildung für nachhaltige Entwicklung“ (BNE) des „KLIMA-Netzwerks für mehr Nachhaltigkeit in Thüringen“ (KLIMA-N) erarbeitet wurden.

SUSTAINABLE DEVELOPMENT GOALS



Abbildung 1: Nachhaltigkeitsziele der UN (UN SDG o. J.)

Der Beitrag ist wie folgt aufgebaut: Im folgenden Abschnitt (2.) wird das Projekt KLIMA-N vorgestellt und dabei speziell auf das Teilprojekt zu BNE der Universität Erfurt eingegangen. Der nächste Abschnitt (3.) widmet sich den konzeptionellen Grundlagen auf der Basis der pragmatistischen Bildungstheorie von John Dewey. Der darauffolgende Abschnitt (4.) stellt die empirischen Ergebnisse aus den Befragungen der Studierenden, der Praxispartner und der Lehrenden vor. Im letzten Abschnitt (5.) werden die Ergebnisse gedeutet und ein Fazit für die weitere Entwicklung des Projekts gezogen.

2. KLIMA-Netzwerk für mehr Nachhaltigkeit in Thüringen – Teilprojekt Bildung für nachhaltige Entwicklung

2.1 Das Projekt KLIMA-N

Das Projekt KLIMA-N wurde im Rahmen der Ausschreibung „Transformationspfade für nachhaltige Hochschulen“ des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) entwickelt. Es handelt sich um eine Kooperation von Thüringer Hochschulen: der Universität Erfurt, der Hochschule Nordhausen, der Technischen Universität Ilmenau und der Fachhochschule Erfurt, koordiniert von letzterer. Adressiert werden in der Ausschreibung Hochschulen als Bildungs- und Wissenschaftsorte gesellschaftliche Entwicklungen und als Orte der Innovation und Impulsgeber für die Region. Ihnen kommt in Zeiten des fortschreitenden Klimawandels und weiterer globaler Krisen eine zentrale Rolle zu: sie können als Stätten technischer und sozialer Innovationen, als Akteure von BNE und als organisatorische Vorbilder einen wichtigen Beitrag zur Transformation der Gesellschaft zu mehr Nachhaltigkeit leisten. Hochschulen als Orte, an denen zukünftige Entscheidungsträger*innen ausgebildet werden und zugleich als Diskursräume, nehmen als Experimentierfeld für Lösungsansätze für mehr Nachhaltigkeit eine Schlüsselfunktion im gesellschaftlichen Transformationsprozess ein (Netzwerk n 2018).

Die im Rahmen des Projekts adressierten Forschungs- und Anwendungsprojekte liegen dabei schwerpunktmäßig in folgenden Bereichen: BNE (Uni Erfurt), Energie und Betrieb (HS Nordhausen), Interne und externe Kommunikationsprozesse (TU Ilmenau), Mobilität und Biodiversität (FH Erfurt). Die jeweiligen Vorhaben sind dabei nicht auf die Hochschulen beschränkt, sondern integrieren – entsprechend ihrer Rolle als regionale Impulsgeberinnen – Akteure aus Verwaltung, Wirtschaft sowie Zivilgesellschaft. Dabei gehen Lehre, Forschung und Transfer Hand in Hand und zielen langfristig auf einen Wandel der beteiligten Hochschulen sowie der Region zu mehr Nachhaltigkeit. Orientiert an den SDGs bedeutet das für die Hochschulen, alle Bereiche hochschulischer Aktivität (Governance, Lehre, Forschung, Betrieb und Transfer) entsprechend zu transformieren und umfassend nachhaltig zu gestalten.

Während die Forschung zu Themen der Nachhaltigkeit, insbesondere zu Fragen von Klimawandel und -anpassung an vielen Hochschulen schon länger fest verankert ist (Schneidewind/Singer-Brodowski 2013) und auch BNE an deutschen Hochschulen eine wichtige Rolle zugeordnet wird (BNE-Portal-Hochschulen o. J., mit weiteren Literaturhinweisen), so muss doch festgestellt werden, dass es sich hierbei bisher kaum um ein ganzheitliches, interdisziplinäres oder auch transformatives Vorgehen handelt. Entwicklungen zu einem nachhaltigen Campus (etwa im Bereich Energieversorgung) stellen Einzelinitiativen dar, die bislang noch überwiegend ohne Nachahmungseffekte bleiben. Ziel von KLIMA-N ist es, dass jede Hochschule den jeweiligen Bereich, in dem sie eine besondere Expertise aufweist, in Bezug auf Umsetzbarkeit weiterentwickelt und diese Erkenntnisse dann im Netzwerk geteilt werden, so dass alle voneinander lernen können und ein ganzheitliches Konzept des Wandels zu mehr Nachhaltigkeit für alle Hochschulen in Thüringen entsteht.

Die Vernetzung Thüringer Hochschulen im Projektverbund soll Transformationsprozesse an Hochschulen im gesamten Freistaat anstoßen. Damit kann das Vorhaben zur Umsetzung der in der Thüringer Nachhaltigkeitsstrategie (TMUEN 2018) festgelegten Schwerpunktfelder für eine nachhaltige Entwicklung in Thüringen beitragen. Zugleich soll durch eine gezielte Aufarbeitung und Veröffentlichung von Good Practices im Rahmen des Vorhabens ein Beitrag zur Bewältigung von Nachhaltigkeitsherausforderungen an Hochschulen in Deutschland geleistet werden. Hierzu soll das Netzwerk der vom BMBF im oben genannten Ausschreibungsformat geförderten Projekte genutzt werden. Die diversen inhaltlichen Schwerpunkte der beteiligten Hochschulen erleichtern durch eine breite Perspektivenvielfalt die Entwicklung ganzheitlicher Lösungsansätze.

2.2 Das Teilprojekt BNE

Bezug nehmend auf den Expertisebereich BNE der Universität Erfurt kann man feststellen, dass es in einigen Bundesländern schon ganze Studiengänge zum Thema Klimamanagement oder Nachhaltigkeit gibt. In Thüringen allerdings wird das Thema BNE nur am Rande thematisiert. Dennoch finden sich schon heute zahlreiche studentische Gruppen, aber auch Einzelinitiativen einzelner Hochschulen, die erste gute Beispiele transformativer Lehr-Lern-Arrangements (LLAs) für mehr Nachhaltigkeit erproben. Ein systemischer Ansatz, der Nachhaltigkeit als Grundbaustein eines jeden Studiengangs denkt und zudem einen transformativen Charakter für alle Bereiche der Hochschule aufweist, fehlt aber bisher. Hier setzt das Teilprojekt zu BNE der Universität Erfurt an und zeigt wie ein ganzheitlicher – dem „Whole Institution Approach“ entsprechender – Kulturwandel zur nachhaltigen Hochschule unter anderem über die Etablierung von BNE funktionieren kann.

Bildung spielt im Transformationsprozess zu einer nachhaltigen Entwicklung eine Schlüsselrolle. Daher wird seit der Jahrtausendwende das Konzept der BNE diskutiert. Sie integriert Aspekte der Umweltbildung, des Verbraucherschutzes, des globalen Lernens und der Menschenrechts- und Friedensbildung, fördert ein reflexives Bildungsverständnis und zielt bei den Lernenden auf die Fähigkeit, sich aktiv in gesellschaftlichen Nachhaltigkeitsfragen engagieren zu können (Vare/Scott 2007).

Von den Vereinten Nationen wurde für die Jahre 2005-2014 eine Weltdekade «Bildung für nachhaltige Entwicklung» ausgerufen mit dem Ziel, nachhaltigkeitsrelevante Inhalte, Methoden und Kompetenzen weltweit in allen Bildungssystemen zu verankern. Obwohl in diesen zehn Jahren erhebliche Fortschritte in der Implementierung von BNE erreicht und vielfältige gute Beispiele zur Umsetzung einer BNE erprobt wurden, sah die UNESCO noch wesentliche Aufgaben vor sich (UNESCO 2014) und rief für die Jahre 2015 bis 2019 ein Weltaktionsprogramm mit fünf Aktionsfeldern aus. In Deutschland wurde das Weltaktionsprogramm BNE von der Nationalen Plattform BNE über sechs Fachforen umgesetzt. Ein Fachforum betraf die Hochschulbildung (BNE-Portal-Weltaktionsprogramm o. J.).

Im Kontext der intensiven Forschung zu BNE wurde die Bedeutung der Gestaltungskompetenz als zentrale Kompetenz einer kritisch-emanzipatorischen BNE hervorgehoben (De Haan 2008, 2009).¹ Das Konzept der Gestaltungskompetenz wurde von Gerhard de Haan entwickelt und im BLK-Programm '21' für BNE in Deutschland umgesetzt. Es wurde mehrfach ergänzt und weiterentwickelt, die Kernelemente sind jedoch dieselben geblieben (De Haan 2006, 21):

- Interdisziplinäres Lernen in einer offenen Art und Weise, die neue Perspektiven integriert,
- Partizipatives Lernen durch gemeinsames Arbeiten und Kommunizieren,
- Innovative Strukturen wie Kooperationsprojekte mit Partnern außerhalb des Bildungssystems.

Unter Gestaltungskompetenz wird eine spezifische Handlungs- und Problemlösungsfähigkeit verstanden. Wer über diese Kompetenz verfügt, kann durch seine aktive Teilnahme an der Gesellschaft dazu beitragen, die Zukunft der Gesellschaft zu verändern und zu gestalten und ihren sozialen, wirtschaftlichen, technologischen und ökologischen Wandel im Sinne einer nachhaltigen Entwicklung zu lenken (De Haan 2006, 22).

Zur Förderung dieser Kompetenz sind experimentelle LLAs zentral, in denen Studierende sich als Entwickler*innen für reale Lösungsansätze erproben können. Diese Form experimenteller LLAs wurde bereits in der pragmatistischen Bildungstheorie von John Dewey entwickelt, auf die im nächsten Abschnitt näher eingegangen wird (Dewey 1993 [1916]).

LLAs, die eine transformative BNE ermöglichen, müssen zwei notwendige Bedingungen erfüllen: (1) Nachhaltigkeitsbezug (durch die explizite Ausrichtung auf ein oder mehrere der SDGs) und (2) Praxisbezug (durch die Zusammenarbeit mit Praxispartnern). Die Universität Erfurt kann bereits mit dem Studium Fundamentale Nachhaltigkeit – einem studentisch organisierten Service Learning-Seminar², das gemeinsam mit Praxispartnern durchgeführt wird (vgl. Hollstein/Tänzer/Thumfart 2013; Hollstein/Singer-Brodowski 2015, Singer-Brodowski 2016) – und dem Capstone-Seminar im Master of Public Policy von Prof. Dr. Andreas Goldthau auf exemplarische LLAs mit Nachhaltigkeits- und transformativen Praxisbezug verweisen (s. Tabelle 1).

¹ In der BNE-Forschung wird ein instrumentelles Verständnis von BNE, das Wissen und Fähigkeiten für individuelles nachhaltiges Handeln bereitstellen will, von einem kritisch-emanzipatorischen Verständnis von BNE unterschieden, das Probleme und Lösungen partizipatorisch reflektieren will und entsprechende Kompetenzen vermitteln möchte (Vare et al. 2022).

² Beim Service Learning wenden Lernende ihr im Studium erworbenes Wissen im Rahmen von gemeinnützigen Projekten (Service) für die Gemeinschaft an und lernen so ihr Wissen in der Praxis anzuwenden (Learning). Service Learning entwickelte sich Mitte der 1980er Jahre durch die Gründung der studentischen Organisation *Campus Outreach Opportunity League* (COOL) und des Netzwerks *Campus Compact* auf der Ebene der Universitätsleitungen zu einem allgemeinen Trend in den USA. In Deutschland gründete sich 2009 das Hochschulnetzwerk *Bildung durch Verantwortung*, das persönliche und gesellschaftliche Verantwortung als Erziehungsaufgabe betrachtet (Netzwerk BDV) (Hollstein/Singer-Brodowski 2015: 152f.). Für einen allgemeinen Überblick zum Service Learning in Deutschland vgl. Baltes/Hofer/Sliwka 2007.

Tabelle 1: LLAs der Universität Erfurt, die die notwendigen Bedingungen erfüllen

LLA	Erläuterungen
Studentisch organisiertes Service Learning-Seminar Nachhaltigkeit im Studium Fundamentale (StuFu Nachhaltigkeit)	BA-Veranstaltungen zum Thema Nachhaltigkeit für Studierende aller Studienrichtungen mit Praxispartner*innen seit 2007
Capstone-Projektgruppen zu Klima und Nachhaltiger Entwicklung der Willy Brandt School of Public Policy (Capstone)	MA-Veranstaltungen im Master of Public Policy für externe Klienten

Daher hat sich die Universität Erfurt vorgenommen, in ihrem Teilprojekt den Bereich BNE in Zusammenarbeit mit dem Verein Zukunftsfähiges Thüringen weiterzuentwickeln und Gelingensbedingungen für eine transformative BNE zu erarbeiten. Neben der Evaluation dieser LLAs soll eine Wirksamkeitsanalyse eine qualitative Weiterentwicklung der jeweiligen LLAs zu KLIMA.LLAs ermöglichen. Neben den oben genannten notwendigen Bedingungen sollen diese noch folgende Kriterien berücksichtigen: (3) überprüfte Wirksamkeit, überprüft anhand im Projekt zu entwickelnden qualitativen Kriterien und (4) Institutionalisiertbarkeit im Verbund (Transferierbarkeit an andere Hochschulen, um Skaleneffekte zu erzielen).

Durch die Kooperation der beteiligten Thüringer Hochschulen soll auf der Grundlage der Wirksamkeitsanalyse von transformativen und nachhaltigkeitsorientierten LLAs die Einführung von KLIMA.LLAs an allen beteiligten Hochschulen ermöglicht werden. KLIMA.LLAs sollen das bestehende Lehrangebot an den verschiedenen Hochschulen ergänzen und fächerübergreifend für Studierende aller beteiligten Hochschulen geöffnet werden. Darüber hinaus soll durch die Integration von Praxispartnern in den KLIMA.LLAs der Transformationsprozess über die Hochschulen hinaus erweitert werden. Vertreter*innen aus Verwaltung, Wirtschaft sowie Zivilgesellschaft werden als Praxispartner einbezogen und die KLIMA.LLAs können so gesellschaftliche Strahlkraft in die Region und darüber hinaus entwickeln.

Das Teilprojekt gliedert sich in vier Aufgabenbereiche:

TP 1.1 Erfassung und Evaluation von LLAs durch Studierende

Beide o. g. LLAs (StuFu Nachhaltigkeit und Capstone) erfüllen die notwendigen Bedingungen für KLIMA.LLAs, zeichnen sich aber auch durch eine gewisse Heterogenität aus, die es ermöglichen soll, unterschiedliche Gelingensbedingungen für wirksame KLIMA.LLAs vergleichend zu identifizieren. In einem ersten Schritt wurden die Lehrvaluationsinstrumente (Online-Fragebögen) in Bezug auf Gelingensbedingungen für eine gute BNE an beide Veranstaltungen angepasst. Die entsprechende Evaluation der Lehrveranstaltungen durch die Studierenden erfolgte im Wintersemester 2022/23 und wurde durch João Tziminadis und Pia Schrage durchgeführt.

TP 1.2 Ermittlung von Transformationspotentialen für BNE durch Praxispartner

Für die Wirksamkeitsanalyse wird auf die Expertise des Vereins Zukunftsfähiges Thüringen e. V. und dessen vom Land gefördertes Projekt „Nachhaltigkeitszentrum Thüringen“ zurückgegriffen. In diesem Rahmen wurden Evaluationsinstrumente zur qualitativen Beurteilung von BNE entwickelt und Zertifizierungen außerschulischer BNE-Angebote durchführt, so dass diese Erfahrungen für die Erforschung der Transformationswirksamkeit von LLAs genutzt werden können. Für die Befragung von Praxispartnern und die Ermittlung von Gelingensbedingungen von KLIMA.LLAs aus der Perspektive von Praxispartnern wurden Aufträge an den Kooperationspartner Zukunftsfähiges Thüringen e. V. vergeben, der auf diese Weise seine Expertise einbringen konnte (Nachhaltigkeitszentrum Thüringen 2018). Die qualitative Befragung von Praxispartnern fand im Sommersemester 2023 statt und wurde durch Martin Abramowski durchgeführt.

TP 1.3 Gelingensbedingungen von KLIMA.LLAs und Qualitätsentwicklung

Im Rahmen von Befragungen relevanter Stakeholder sollen Gelingensbedingungen für gute BNE in Form von KLIMA.LLAs identifiziert werden. Neben den Studierenden (s. TP 1.1) und den Praxispartnern (s. TP 1.2) sind Lehrende sowie administratives Personal im Bereich des Qualitätsmanagements für die Lehre weitere relevante Akteure, die in qualitativen Interviews befragt wurden. Die qualitativen, leitfadengestützten Interviews mit Lehrenden fanden im Sommersemester 2023 statt und wurden durch João Tziminadis durchgeführt.

Bei der Auswertung sollen mit Blick auf die theoretisch-konzeptionellen Grundlagen einer pragmatistischen Bildungstheorie (s. Abschnitt 3) verschiedene Aspekte unterschieden werden, nämlich die Bedeutung von institutionellen Rahmenbedingungen (Anreize, Restriktionen usw.), die von Werten und Vorstellungen des guten Lebens (SDGs, Selbstwirksamkeitserfahrungen, intrinsische Motivation) sowie die Bedeutung von Praktiken und Routinen (kulturell bestimmte Gewohnheiten und Erfahrungen). Dabei sollen alle beteiligten Stakeholder in den Blick genommen werden, d. h. auch die Ergebnisse aus TP 1.1 und TP 1.2 sollen in die Qualitätsentwicklung eingespeist werden.

TP 1.4 Einspeisung von KLIMA.LLAs in das Netzwerk

In Zusammenarbeit mit der Arbeitsstelle Nachhaltigkeitskommunikation (ANK) der TU Ilmenau sollen Vorschläge erarbeitet werden, wie für die Adaptation durch andere Hochschulen geeignete KLIMA.LLAs als Best-Practice-Beispiele so aufbereitet werden können, dass sie für unterschiedliche Studienrichtungen an Hochschulen genutzt werden können, um Skaleneffekte zu erreichen, z. B. in Bezug auf Koordination und Kooperation mit Praxispartnern. Dabei wird zunächst auf bereits vorhandene Lehrveranstaltungen an den anderen Hochschulen zurückgegriffen. Prospektiv sollen Prüfungsordnungen so angepasst werden, dass an möglichst allen Hochschulen KLIMA.LLAs in die Studienordnungen integriert werden können. Eine Institutionalisierung soll dadurch erreicht werden, dass KLIMA.LLAs (ggf. mit anderer Bezeichnung) in allen Prüfungsordnungen als Option vorgesehen werden können. Da hier auch Akkreditierungsfragen relevant sind, sollen in Zusammenarbeit mit der ANK beispielhafte Anpassungen oder Formulierungsvorschläge für Prüfungsordnungen entwickelt werden. Die Bearbeitung dieses Aufgabenbereichs ist für die Jahre 2024 und 2025 vorgesehen und wird von Hasnain Bokhari bearbeitet werden.

3. Konzeptionelle Grundlagen aus der pragmatistischen Bildungstheorie¹

Der pragmatistische Philosoph John Dewey (1859-1952) ist für seinen pädagogischen Ansatz des experimentellen Lernens durch Erfahrung bekannt. Im Jahr 1916 veröffentlichte er *Democracy and Education* (Dewey 1993 [1916]), ein Werk, das auch 100 Jahre nach seinem Erscheinen noch hochaktuell ist, wie neuere Veröffentlichungen zeigen (Waks/English 2017; Cochran 2010). In diesem Buch verbindet Dewey die Bildung mit der Demokratie, wobei er einen sehr weit gefassten Begriff von Demokratie verwendet:

„Die Demokratie ist mehr als eine Regierungsform; sie ist in erster Linie eine Form des Zusammenlebens, der gemeinsamen und miteinander geteilten Erfahrung. Die Vermehrung der Individuen, die an einer bestimmten Angelegenheit so interessiert sind, daß jeder sein Handeln zu dem der anderen in Beziehung zu setzen und umgekehrt das Handeln der anderen für sein Tun in Rechnung zu stellen hat, und die Vergrößerung des Raumes, über

¹ Die konzeptionellen Grundlagen für das Projekt wurden bereits in dem Beitrag „Learning by Doing“ in *Higher Education. Empirical Insights into Education for Sustainable Development* von Bettina Hollstein und João Tziminadis dargelegt, der bei dem Fachjournal „Revista Ibero-Americana de Estudos em Educação“ für die Sonderausgabe zu BNE eingereicht wurde (erscheint voraussichtlich in 2024) und sich detailliert mit der Studierendenevaluation befasst.

den sie verteilt sind, bedeutet den Niederbruch jener Schranken zwischen Klassen, Rassen und nationalen Gebieten, die es den Menschen unmöglich machten, die volle Tragweite ihrer Handlungen zu erkennen.“ (Dewey 1993 [1916], 121)

Demokratie ist demnach eine Lebensweise, “forming personal character and determining desire and purpose in all the relations of life” (Dewey 1988 [1939], 225-26). Dieses weit gefasste Demokratiekonzept ähnelt stark dem der nachhaltigen Entwicklung, wie es durch die 17 Ziele für nachhaltige Entwicklung beschrieben wird, da es auf eine Vision des guten Lebens als ein erfülltes, in soziale Beziehungen eingebettetes und in Frieden mit der Natur lebendes Leben ausgerichtet ist (Rosa/Henning 2018). Daher scheint es besonders geeignet, um als konzeptionelle Grundlage für BNE zu dienen.

Wie oben dargelegt, ist das Ziel „Hochwertige Bildung“ zur Erreichung der SDGs weitgehend unumstritten. Die Besonderheit, die Dewey hier einbringt, ist die, dass er Bildung mit Demokratie verbindet als Mittel zur Erreichung des Ziels eines guten Lebens für alle. Dieses normative universalistische Ziel kann man als umfassende Nachhaltigkeit im Sinne von intragenerationeller und intergenerationeller Gerechtigkeit (Ekardt 2010) rekonstruieren. Zugleich ermöglicht aber die pragmatistische Herangehensweise einen problemorientierten und situativen Zugriff, der handlungsanleitend wirkt. Deweys Demokratieideal betont dabei folgende Aspekte: Erfahrung, Partizipation, Experimentieren und pluralistische Organisationsformen (Knight Abowitz 2017, 64f.). Diese Aspekte stehen auch im Kern einer emanzipatorischen BNE, wie sie etwa mit dem Fokus auf 'Gestaltungskompetenz' (De Haan 2006) oben dargelegt wurde. Dieses Konzept von BNE zielt darauf ab, die Kluft zwischen der Tradition der Bildung als offenem Begriff der Persönlichkeitsbildung und dem Qualifikationsbegriff des beruflichen Lernens zu überbrücken und schließt sowohl Motive als auch Einstellungen ein (Vare et al. 2002, 4f. mit Verweis auf Heinrich Roth (Rieckmann 2012)). Im Rahmen dieses Konzepts wird darauf abgezielt, Kontroversen und Probleme auf partizipative Weise zu reflektieren.

Die Elemente der Gestaltungskompetenz im Sinne von De Haan sind in besonderer Weise anschlussfähig an das Bildungskonzept von Dewey, der aber mit der Verknüpfung von Bildung und Demokratie noch darüber hinausweist. Das von De Haan geforderte interdisziplinäre Lernen, das neue Perspektiven integriert (erstes Kernelement), wird im normativen Ideal von Dewey für eine gute und offene Gesellschaft, durch die Auseinandersetzung mit einer großen ‚diversity of stimuli‘, wie Dewey es ausdrückt, ermöglicht.

“The goal in democratic education is to struggle against isolation and separation so that our diverse and varied interests can interact and influence each other.” (Thayer-Bacon 2017, 229)

Das allgemeine Ziel von Bildung (im Sinne eines humboldtschen Bildungsideals (Mittelstraß 2006)) ist die Entwicklung von Tugend oder eines moralischen Charakters (Waks 2017a, 13). David Hansen stellt in seinem Vorwort zum *Centennial Handbook to Dewey's Democracy and Education* fest:

“[T]o become educated, for Dewey, just is to become more open and engaged with the world, which is precisely his notion of what it is to become a democratic citizen” (Hansen 2017, XX).

Die Auseinandersetzung mit Problemen, mit der Welt und ihrer Vielfalt ist immer eine Art von Handlung, da für Dewey jede menschliche Handlung eine soziale Welt oder einen situativen Kontext voraussetzt, in dem sie stattfindet (Waks 2017a, 6). Aktivitäten, die sich mit der weiteren Welt verbinden, stellen das soziale und situative Element des Lernens dar (Rud 2017, 36).

Im Vorwort zum Buch *John Dewey and our educational prospect* heißt es:

“Dewey argues in the pages of *Democracy and Education* that those who understand how to learn and who are by habit open to new learning are on the way to becoming democratic citizens. [...] ‘democratic life’ constitutes another name for a life of inquiring, communicating,

and learning (Hansen 2006, VII).

Hier wird das zweite Kernelement von De Haan (partizipatives Lernen durch gemeinsames Arbeiten und Kommunizieren) angesprochen.

“Living in the world with others means that our actions affect others and we need to use empathic imagination and communication to understand how others see the world.” (English 2017, 106)

Neben der Auseinandersetzung mit Problemen, und mit einer diversen und perspektivenreichen Welt, ist die gemeinsame Arbeit und Kommunikation zentral für BNE wie für die Bildung zu einem/einer demokratischen Bürger*in.

Das gemeinsame Tun und die Rückmeldung über die Ergebnisse des eigenen Handelns liefern Erfahrungen, die in Deweys Theorie für das Lernen entscheidend sind (Waks 2017b, 18). „*Learning by doing*“ ist daher das prominenteste Zitat von Dewey und bringt Lernen mit Handeln in Verbindung. Hier können die von De Haan genannten innovativen Strukturen, wie die Zusammenarbeit mit Kooperationspartnern (drittes Kernelement) fruchtbar gemacht werden. Dieser Aspekt des Lernens durch Handeln und Erfahrung ist für BNE von großer Bedeutung, da sich BNE nicht auf die Vermittlung von Informationen oder Wissen beschränkt, sondern darauf abzielt, Einsicht, Motivation und Engagement für eine nachhaltige Entwicklung zu vermitteln. Dieser pragmatistische Ansatz wurde auch von Öhman und Sund (2021) verwendet, die das von Scott (2011) vorgeschlagene Konzept des „*sustainability commitment*“¹ nutzen, das die drei miteinander verbundenen Aspekte (intellektuelles) Wissen, (emotionale) Motivation und (praktische) Erfahrung kombiniert (Vare 2022, 16).

“The model suggest that sustainability commitment should be a common goal for ESE [Environmental and Sustainability Education] and that a sound commitment is situated at the intersection of the intellectual, emotional and practical aspects of sustainability” (Öhman, Sund 2021, 16).

Der pragmatistische Ansatz des problemlösenden und situierten Lernens durch Erfahrungen, die zu Nachhaltigkeitsengagement führen, ist daher zentral für die Entwicklung von BNE.

Die Beachtung der Elemente Perspektivenvielfalt, Kommunikation, Partizipation und Engagement mit der Welt, um gemeinsame Erfahrungen zu machen, andere zu verstehen und Solidarität zu schaffen, ist entscheidend für Deweys Bildungsansatz und gibt einen Hinweis darauf, wie wir den Rahmen für BNE weiter konzeptualisieren können.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die pragmatistische Bildungstheorie Bildung (als gemeinsame Erfahrung des Problemlösens) und Demokratie eng miteinander verknüpft und so einen Rahmen für BNE bietet, der nicht nur Wissen vermittelt, sondern Kognition, Motivation, Wille, Emotionen und Werte integriert. Daher kann der Ansatz der Gestaltungskompetenz pragmatistisch reformuliert werden. Ein Bildungsrahmen für BNE, der auf pragmatistischen Einsichten basiert, muss daher von Problemen in der Lebenswelt (1) ausgehen, die die Schüler*innen betreffen und für sie von Bedeutung sind. Er muss die Möglichkeit bieten, sich mit der Welt auseinanderzusetzen und mit vielfältigen und unterschiedlichen Interessen und Perspektiven in Kontakt zu kommen (2). Er muss es den Lernenden erlauben zu kommunizieren, zu partizipieren und zu interagieren, um andere zu verstehen, Entscheidungen im Team zu treffen und sich selbstwirksam zu fühlen, wenn man Feedback erhält (3). Wenn eine solche Lernumgebung bereitgestellt werden kann, können die Studierenden nicht nur BNE lernen, sondern sich auch als demokratische Bürger*innen entwickeln.

¹ Scott zeigt in seinem review essay, dass “the priority must be to engage young people with ideas about sustainability through imaginative teaching strategies that provide stimulating opportunities for learning, including practice at citizenly engagement” (2021: 409).

4. Empirische Ergebnisse

Im Rahmen des unter 2. beschriebenen Teilprojekts wurden drei verschiedene Stakeholder-Gruppen untersucht: die Studierenden, die Praxispartner und die Lehrenden. In allen drei Gruppen ging es darum, die jeweiligen Erfahrungen der Beteiligten mit konkreten LLAs ernst zu nehmen und Gelingensbedingungen für eine transformative BNE zu ermitteln.

4.1 Die Studierenden

Bezüglich der Studierenden wurden das methodische Design, die konkrete Herangehensweise und die Auswertung der Evaluationen an anderer Stelle ausführlich dargelegt (Hollstein/Tziminadis 2024). Bezüglich der Studierenden kann man festhalten, dass auch in LLAs, die sich in Bezug auf die Zielgruppe der Studierenden (BA-Studierenden aller Studienfächer einerseits und MA-Studierende eines speziellen MA-Programms andererseits) deutlich unterschieden, bestimmte Aspekte generell als bedeutsam für den individuellen Lernerfolg gesehen wurden. Die Befragungsergebnisse sind in Tabelle 2 dargestellt, wobei die Studierenden von 1 = ‚stimme gar nicht zu‘ bis zu 7 = ‚stimme vollkommen zu‘ wählen konnten.

Tabelle 2 – Aggregierte Evaluationsergebnisse der Studierenden

Elemente \ LLA	StuFu Nachhaltigkeit	Capstone	Gesamt
Lernerfahrung	4.97	5.8	5.39
<i>Service Learning</i>	4.74	5.97	5.28
(1) Praxismehrwert	5.4	6.45	5.93
(2) Erwarteter Fähigkeitenerwerb	4.2	6.27	5.24
(3) Unerwarteter Fähigkeitenerwerb	4.5	5.3	4.9
(4) Anwendung von Theorie	4.7	6.27	5.49
(5) Erfahrungsaufbau	4.9	5.55	5.23
<i>Gestaltungskompetenzen</i>	5.22	6.22	5.72
(1) neue Perspektiven	5.6	6.03	5.81
(2) Interdisziplinarität	5.4	6.27	5.83
(3) Kooperation	5.6	6.32	5.96
(4) Kollektives Entscheiden	5.6	6.27	5.94
(5) Motivation	4.56	6.4	5.48
(6) Autonomie	4.56	6.4	5.48
Selbstwirksamkeit	5.3	5.8	5.55
Gesamt	5.13	5.8	5.47

Ohne hier auf die Details eingehen zu können¹, kann man festhalten, dass die Studierenden folgende Elemente der LLAs als besonders wichtig für ihre Lernerfahrung bewerteten:

- *Praxismehrwert*, d. h. die Tatsache, dass sie mit realen Problemen der Gesellschaft konfrontiert waren und einen Beitrag dazu leisten konnten,
- *Interdisziplinarität* bzw. *neue und diverse Perspektiven*, also die Tatsache, dass sie mit Menschen aus unterschiedlichen Kontexten und Erfahrungshintergründen und mit neuen Problemkontexten zusammengearbeitet haben,
- *Kooperation* und *kollektives Entscheiden*, also die Tatsache, dass man in Gruppen Aushandlungsprozesse und Abstimmungsverfahren finden muss, um zu einer gemeinsamen Handlungsweise zu kommen.

Unsere Daten haben gezeigt, dass eine größere Vielfalt in Bezug auf den nationalen Hintergrund der Studierenden mit einer höheren Bewertung von BNE verbunden ist. Weiterhin ergab sich, dass nicht nur lokale Probleme, mit denen die Lernenden in ihrem Alltag vertraut sind, als Grundlage für transformatives Engagement geeignet. Vielmehr können auch globale Probleme, die sich auf unterschiedliche und weit entfernte Lebenswelten beziehen, effektive Erfahrungsplattformen für den Erwerb von Gestaltungskompetenz im Rahmen von BNE bieten.

4.2 Die Praxispartner

Für die Befragung der Praxispartner wurde der Verein Zukunftsfähiges Thüringen e. V. beauftragt, der durch die Zertifizierung von außerschulischen Bildungsakteuren als BNE-Akteure über eine besondere Kompetenz sowie einen guten Feldzugang verfügt, da der Verein schon seit vielen Jahren selbst Praxispartner des StuFu Nachhaltigkeit der Universität Erfurt ist. Die folgenden Überlegungen stützen sich auf den Bericht zur Befragung der Praxispartner des StuFu Nachhaltigkeit, der vom Verein Zukunftsfähiges Thüringen e. V. im Dezember 2023 vorgelegt wurde (Zukunftsfähiges Thüringen 2023).

Der transformative BNE-Ansatz des StuFu Nachhaltigkeit wird durch die projektbezogene Kooperation mit einem Praxispartner aus einer kommunalen Institution, einer zivilgesellschaftlichen Organisation oder einem Unternehmen, immer mit Bezug zu nachhaltiger Entwicklung, unterstrichen. Die gemeinsame Projektarbeit mit den Praxispartnern, soll die eigenständige Organisation der Studierenden sowie das problemorientierte, forschende Lernen unterstützen. Die BNE-Roadmap, das Aktionsprogramm, das 2021 von der UNESCO beschlossen wurde, definiert folgende prioritären Handlungsfelder, die für die Entwicklung von Qualitätskriterien für BNE-Akteure leitend sind:

- die Kompetenzentwicklung bei Lehrenden,
- die Stärkung und Mobilisierung der Jugend,
- die Förderung der nachhaltigen Entwicklung auf lokaler Ebene und
- die politische Unterstützung (UNESCO 2021).

Während die Kompetenzentwicklung bei Lehrenden und die Stärkung der Jugend (hier der Studierenden) genuine Elemente von BNE an Hochschulen darstellen, werden durch die Einbindung von Praxispartnern die Aspekte der Förderung der nachhaltigen Entwicklung auf lokaler Ebene und die politische Unterstützung besonders adressiert. Praxispartner, als engagierte Experten für bestimmte Themenfelder, erscheinen hier als anschlussfähige Mittler zwischen Aktionsprogramm, der Herausforderung Nachhaltigkeit vor Ort umzusetzen und der Hochschule. Sie sind es, die für

¹ Für eine ausführliche Darstellung der Ergebnisse und ihre kritische Diskussion vgl. Hollstein/Tziminadis 2024.

Studierende Erfahrungsräume zu nachhaltiger Entwicklung eröffnen können, in denen diese sich mit konkreten Herausforderungen der Nachhaltigkeit und des gesellschaftlichen Miteinanders beschäftigen können. Studierende können dabei als engagierte und kompetente Gestalter des gesellschaftlichen Wandels (Change Agents) auftreten. Praxispartner sind mit ihrem Zugang zu den lokalen Anforderungen einer nachhaltigen Kommune kompetente Partner für eine Zusammenarbeit, die als Beitrag zur Verknüpfung zwischen Bildungseinrichtungen und Kommune wertgeschätzt und verstetigt werden sollte.

Die Befragung sollte aufzeigen, inwiefern die programmatischen Aussagen zu Praxispartnern als Bildungspartner sich auch empirisch durch deren konkrete Erfahrungen in der Mitwirkung bei LLAs bestätigen lassen und welche Gelingensbedingungen nicht nur konzeptionell, sondern auch praktisch relevant werden.

Folgende Gelingensbedingungen, die im Rahmen des Projekts entwickelt wurden, wurden dabei untersucht:

- 1) Gelingensbedingungen mit Blick auf die organisatorische Verfasstheit
 - Interne Kommunikation: Nachhaltige Entwicklung und die Umsetzung darauf bezogener Projekte soll Gegenstand der internen Kommunikation sein, so dass die Mitglieder der Organisation über aktuelle Umsetzungen informiert werden und Nachhaltigkeit als wichtiges Thema der internen Kommunikation etabliert ist.
 - Wertorientierung: Der die Praxispartner vertritt öffentlich sowie auf organisatorischer Ebene die Werte der nachhaltigen Entwicklung und agiert wertegeleitet auf dieser Grundlage. Bezugsrahmen für diese Wertorientierung stellen die nachhaltigen Entwicklungsziele der Vereinten Nationen (SDGs), die Deutsche Nachhaltigkeitsstrategie, die Thüringer Nachhaltigkeitsstrategie und daran angelehnte Konzepte dar.
 - Mitarbeiter*innen: Der Praxispartner kann kompetentes Personal für eine zielgruppenorientierte Realisierung und Durchführung von Praxisprojekten mit Studierenden zu Themen der Nachhaltigkeit als Ansprechpartner*innen bereitstellen. Für die Teilnehmenden stehen während der Projektumsetzung (feste) Ansprechpartner*innen zur Verfügung, die sie bei der Umsetzung begleiten und unterstützen.
 - Kontinuität: Der Praxispartner unterstützt eine öffentlichkeitswirksame Darstellung der Umsetzungen von Projekten zu nachhaltiger Entwicklung (u. a. im Rahmen von Projekttagen). Dabei wird der Bezug der Aktivitäten zum anvisierten Bezugsrahmen (z. B. Nachhaltigkeitsstrategie) deutlich gemacht.
 - Konsistenz: Die Gestaltung und Umsetzung von Projekten orientiert sich allgemein an Standards nachhaltiger Entwicklung (z. B. Inklusion, Ressourcenschonung, Klimaneutralität). Damit verfolgt die Projektumsetzung nicht nur eine konkrete Zielsetzung eines nachhaltigen Projekts, sondern richtet sich in der gesamten Gestaltung, Herangehensweise und Realisierung nach diesem Leitbild aus.
- 2) Gelingensbedingungen mit Blick auf das gemeinsame Lernen mit Studierenden
 - Angemessene Zielsetzung: Auf Grundlage des Praxisbezugs kann der Praxispartner eine konkrete Zielsetzung für studentische Mikroprojekte zur nachhaltigen Entwicklung formulieren und in die Gestaltung der Projekte einbringen. Dieses Ziel lässt sich, auch in Anbetracht der zur Verfügung stehenden zeitlichen und personellen Ressourcen, erfolgreich bearbeiten.
 - Teilnehmendenorientierung: Die zu bearbeitende Aufgabe ist in ihrer Anforderung den Teilnehmenden angemessen. Sie berücksichtigt den Stand des Wissens der Teilnehmenden und knüpft bestenfalls an deren Erfahrungen an. Damit soll die eigenständige und

zielorientierte Bearbeitbarkeit durch die Teilnehmenden gewährleistet werden.

- Vielfalt der Perspektiven: Die Begleitung der Teilnehmenden durch den Praxispartner erfolgt unvoreingenommen, experimentierfreudig und fördert die Beteiligung aller. Eine gemeinsame Auseinandersetzung zur Zielerreichung, auch ausgehend von unterschiedlichen Herangehensweisen und Lösungsansätzen der Teilnehmenden, stellt ein wesentliches Element der BNE dar. Dabei bietet sich einerseits die Möglichkeit an, verschiedene Handlungsoptionen gegeneinander abzuwägen, oder andererseits gleichzeitig alle Teilnehmenden motivierend in den gemeinsamen Realisierungsprozess einzubeziehen.
- Kompetenzorientierung: Die aktive Beteiligung der Teilnehmenden bei der Gestaltung des Projekts und die Eigenverantwortlichkeit bei deren Umsetzung fördern den Erwerb von Kompetenzen. Diese Kompetenzen können im Rahmen des Projekts als Lernziel berücksichtigt werden.
- Beteiligung der Teilnehmenden: In die Öffentlichkeitsarbeit zum jeweiligen Projekt werden die Teilnehmenden aktiv eingebunden. Sie berichten, ggf. unter Anleitung, über die Durchführung des Projekts, ihre Beteiligung bei der Realisierung und/oder die gesammelten Erfahrungen.
- Selbstevaluation: Im Verlauf des Projekts bestehen ausreichend Möglichkeiten, die einzelnen Planungs- und Umsetzungsschritte mit Blick auf die Praxis zu reflektieren. Der Praxispartner bietet dabei ausreichend Anleitung bzw. Unterstützung für eine kritische Auseinandersetzung und eine zielgerichtete Einbindung der gemeinsamen Reflexion an.

Die Befragung bestand aus einer Online-Befragung und vertiefenden Interviews. An der Online-Befragung haben 21 von 29 Praxispartnern teilgenommen. Vertiefende Interviews wurden mit drei Praxispartnern durchgeführt. Folgende Ergebnisse kann man festhalten:

Knapp zwei Drittel der Befragten nehmen für sich in Anspruch, im Rahmen ihrer *internen Kommunikation* Nachhaltigkeit als wichtiges Thema zu bedienen. Keiner der Befragten verneint völlig den internen Umgang mit diesem Thema. Entsprechend kann man davon ausgehen, dass die Praxispartner mit zumindest einem Grundwissen zu nachhaltiger Entwicklung ausgestattet sind, wenn sie sich an den LLAs beteiligen.

Dieser Eindruck bestätigt sich beim Blick auf die vorhandenen *Erfahrungen bei der Zusammenarbeit mit Studierenden*. Hier werden sowohl die praktischen Erfahrungen der Organisation mit nachhaltiger Entwicklung als auch die Qualität der Mitarbeitenden der Organisation als gute Grundlage für die Begleitung eines StuFu Nachhaltigkeits-Projektes von ebenfalls knapp zwei Dritteln vergleichsweise hoch bewertet. Die als gelebte Praxis beschriebene Umsetzung der Wertorientierung fällt dagegen in der Bewertung etwas ab. Das kann mit unterschiedlichen Standards bei der Bewertung von nachhaltiger Entwicklung zusammenhängen, als auch mit der im Sinne der nachhaltigen Entwicklung in hohem Maße als unvollkommen wahrgenommenen Alltagspraxis verbunden sein. Die Bewertungen bezüglich der Erfahrungen mit der Gestaltung von Bildungsarbeit sind insgesamt auf dem gleichen Niveau relativ niedrig bewertet. Das ist insofern irritierend, als etwa dreiviertel aller Befragten angaben, dass Bildungsarbeit ein Arbeitsbereich der von ihnen vertretenen Organisation ist.

Auffällig ist in Bezug auf die Fragen zur Projektumsetzung, dass trotz der hohen Anzahl von Organisationen, die Bildungsarbeit zu ihrem Arbeitsbereich zählen, von den Befragten *der praktische bzw. praxisorientierte Zugang* zum StuFu Nachhaltigkeit häufiger genannt wird als der pädagogisch fundierte Zugang. Die interne Verankerung des Themas „Nachhaltigkeit“ und dessen Umsetzung durch engagierte Mitarbeiter*innen in der Organisation anknüpfend an konkrete Problemlagen der Praxis erweist sich so als wesentliche Ausgangsbasis für die Begleitung eines Praxisprojektes.

Bei Fragen nach der konkreten *Gestaltung der Projektdurchführung* waren Fragen zu konkreten Verfahrensweisen am höchsten bewertet. Beispielsweise wurde die Frage nach der Umsetzung des

kollegialen „Du“ für die Projektumsetzung sehr hoch bewertet. 9 von 11 Befragten bestätigen diese Praxis ohne Einschränkung, was bestätigt, dass die Praxispartner versuchen, den Studierenden auf Augenhöhe zu begegnen und ihnen eine eigene Handlungskompetenz zumindest auf dieser symbolischen Ebene zuzuweisen. Mit dem kollegialen „Du“ und dessen bewusster Pflege während der Projektumsetzung bewegen sich Praxispartner und Studierende als gleichsam Lernende aufeinander zu. Damit kann ein erster Schritt zu einer hierarchiefreien Lernatmosphäre und zu einem gemeinsamen Lernprozess eröffnet werden. Die Frage nach der Möglichkeit zur Einbringung eigener Ideen seitens der Studierenden erfährt mit 12 Nennungen in der Bewertungskategorie „trifft vollkommen zu“ die höchste Bewertung der Befragung insgesamt. Die als zentral genannte Ermöglichung des Einbringens studentischer Ideen in die Projektumsetzung kann als eingelöste Teilhabe an der Projektgestaltung (Vielfalt der Perspektiven, Teilnehmendenorientierung) gesehen werden. Damit zeigt sich für den Einstieg in die Durchführung von praxisorientierten LLA eine für die Umsetzung gelingender BNE günstige Ausgangslage.

Der Blick auf die weiteren Antworten zur *inhaltlichen Projektgestaltung*, stützt diese Folgerung nur zum Teil. Hier werden die realisierte Teilhabe der Studierenden an der inhaltlichen Ausgestaltung von Projektideen, der Weiterentwicklung von Projektzielen (angemessene Zielsetzung) und die tatsächliche Einbringung studentischer Ideen deutlich geringer bewertet. Gerade der signifikante Unterschied zwischen der hohen Bewertung der Frage zur Ermöglichung der Einbringung eigener Ideen und der geringen tatsächlichen Einbringung studentischer Ideen verweisen auf die Notwendigkeit, einer weitergehenden Überprüfung der Ergebnisse und ihrer Ursachen.

Auch wird die *Diskussionsbereitschaft* der Studierenden als Teil der gemeinsamen Projektumsetzung als gering eingeordnet. Die Fragen nach der tatsächlichen, gemeinsamen Diskussion über ganz verschiedenen Vorstellungen von Nachhaltigkeit (Vielfalt der Perspektiven) wurde in diesem Bereich am niedrigsten bewertet. Hier besteht eine Diskrepanz zur beschriebenen hohen internen Kommunikation der Praxispartner über nachhaltige Entwicklung. Allerdings wird dieses Verhalten ähnlich zurückhaltend bewertet wie die eigene inhaltliche Auseinandersetzung mit unterschiedlichen Herangehensweisen bei der nachhaltigen Entwicklung. Die Diskussion der Studierenden über geeignete Umsetzungen und verschiedene Vorstellungen von Nachhaltigkeit kann gerade bei einer prononcierten Position des Praxispartners auch in Gesprächsrunden ohne den Praxispartner erfolgt sein, was allerdings den Eindruck einer mangelnden Kommunikation hinterlässt.

Die genannten Ergebnisse bestärkt den Eindruck, dass die Diskussion über die Projekthalte als tragendes Element der Umsetzung nicht wirklich etabliert ist. Sowohl die gemeinsame Auswertung zum Abschluss des Projekts, die kritische Begutachtung der eigenen Projektarbeit (Selbstevaluation), die Diskussion und Mitteilung von neuen praktischen Erfahrungen werden sehr niedrig bewertet. Auch die interne Berichterstattung über die Projektarbeit seitens des Praxispartners wird sehr niedrig bewertet. Damit zeigt sich eine fehlende Diskussionskultur zwischen den Beteiligten in den Projekten. Die fehlende inhaltliche Diskussion macht sich auch bei der Bewertung der eigenständigen Einhaltung von Standards durch die Studierenden (Konsistenz) bemerkbar, die ebenfalls niedrig bewertet wird.

Hingegen wird die erfolgreiche *gemeinsame Bearbeitung des Praxisteils der Projekte* durch die Studierenden insgesamt (Kompetenzorientierung) sehr positiv beurteilt, was dann auch zu insgesamt positiven Rückmeldungen der Befragten zur Durchführung des StuFu Nachhaltigkeit als positive Erfahrung führt. Diese Frage erfährt eine sehr hohe positive Bewertung. Auch eine erneute Teilnahme am StuFu Nachhaltigkeit wird von knapp der Hälfte der Befragten in Aussicht gestellt. Das durchgeführte Projekt wird außerdem als gelungener Beitrag zur nachhaltigen Entwicklung gewertet und die Erfahrungen aus dem Projekt werden als neue Impulse für die eigene Arbeit eingestuft. Hier wird implizit der gemeinsame Lernprozess aufgegriffen. Dazu passt, dass Praxispartner teilweise eine stärkere Einbindung in das StuFu Nachhaltigkeit wünschen, gerade was die Vermittlung theoretischer Grundlagen betrifft. Möglicherweise deutet sich hier eine Ursache für die kaum erfolgte gemeinsame Diskussion von verschiedenen Zugangsweisen zu nachhaltiger Entwicklung an.

4.2 Die Lehrenden

Es wurden sechs Lehrende, die BNE-Veranstaltungen anbieten, mit Hilfe von Leitfadeninterviews befragt. Die wurden zu vier Themenbereichen gestellt (Seminarorganisation, eigene Erfahrungen, Nutzen für Praxispartner und allgemeine Schlussfolgerungen). Die Interviews wurden anonymisiert und transkribiert, um sie dann systematisch auszuwerten.

Als Ergebnisse der Analyse der Interviews können folgende Elemente von Bedeutung für eine gelingende BNE festgehalten werden:

Alle Lehrenden betonten die Bedeutung der *Praxis*, wobei vier Aspekte unterschieden wurden:

- Praxis als wichtiges Element, um Nachhaltigkeit in den Haltungen der Studierenden zu verankern (Hier wurde betont, dass es darum geht, den Studierenden zu ermöglichen, eigene Erfahrungen zu machen mit der Bearbeitung eines sie betreffenden Nachhaltigkeitsproblems, die sie dann reflektieren – z. B. im Form eines Reflexionsberichts.)
- Praxis als Ermöglichung für kritisches Denken (Hier wurde explizit Bezug genommen auf eine kritisch-emanzipatorische BNE, die Studierenden in der Auseinandersetzung mit experimentellen Zugängen entwickeln sollen.)
- Praxis als Verbindungsglied zur Welt außerhalb der Hochschule (Dieser Aspekt wird mit dem Transformationspotential von BNE in Verbindung gebracht, für das reale Projekte eine große Rolle spielen.)
- Praxis als institutionalisierte und routinisierte Nachhaltigkeitspraktiken (Für diesen Aspekt spielt der ‚Whole Institution Approach‘ eine Rolle, da es darum geht, nachhaltige Praktiken in den Alltag der Hochschule zu integrieren.)

Weiterhin zeigt sich, dass in fast allen Fällen in den durchgeführten LLAs *Gruppenarbeit* als Lehr- und Lernform eine zentrale Rolle spielt. Gruppenarbeit, in der sich unterschiedliche Beziehungen zwischen Studierenden, Lehrenden und Praxispartnern aufbauen, wird von allen Lehrenden als wesentlich hervorgehoben. Diesbezüglich werden zwei Aspekte unterschieden:

- Das richtige Maß an *Unabhängigkeit und Anleitung* stelle eine zentrale Herausforderung dar. Alle Lehrenden versuchen in Abhängigkeit von der jeweiligen Lernsituation den Studierenden ein möglichst großes Maß an Autonomie und Selbstbestimmung in LLAs zu geben, auch wenn manche Studierenden mehr Anleitung wünschen. Dies betrifft beispielsweise die Wahl des Projekts, der Zusammenstellung und Organisation der Projektgruppe oder die Literatursuche und Methodenwahl. Wieviel Autonomie und Unabhängigkeit den Studierenden im Lernprozess ermöglicht werden kann, hängt sehr davon ab, wie fortgeschritten sie sind, wie nah an ihren Alltagserfahrungen das Projekt ist, über wieviel Vorwissen in theoretischer und praktischer Hinsicht sie verfügen, wie variabel die Projekte gestaltet werden können usw. Ein hohes Maß an Autonomie ist für einige Studierenden herausfordernd und erfordert eine unterstützende Begleitung.

Strukturelle Vorgaben der LLAs (z. B. ein erforderlicher Theorieinput) können die Selbstorganisation der Studierenden einschränken, scheinen aber notwendig zu sein, um eine gemeinsame Wissensbasis für die Teilnehmenden zu gewährleisten. Andere strukturelle Vorgaben sind gemeinsame Meilensteine oder terminlich festgelegte Projektergebnisse, die für eine Zusammenarbeit in der Gruppe erforderlich sind.

Schließlich sind die Freiheitsgrade, die von den Praxispartnern eingeräumt werden, teilweise unterschiedlich. Manche haben sehr klare Vorstellungen davon, welche Art von Projekt die Studierenden realisieren sollen, andere überlassen es den Studierenden ein Projekt selbstständig zu entwickeln. Studierende reagieren unterschiedlich auf diese Anforderungen,

daher scheint es sinnvoll zu sein, ihnen die Wahl des Projekts und des Praxispartners zu überlassen, so dass sie selbst das Ausmaß an Autonomie oder Anleitung mitbestimmen können, was zu ihrer Motivation beitragen sollte.

- Der zweite Aspekt, der in Bezug auf die Gruppenarbeit von den Lehrenden betont wird, ist das Verhältnis von *Theorie und Praxis*. In den meisten Fällen erfüllt die Theorie eine dienende Funktion im Verhältnis zur Praxis und soll ein grundlegendes Wissen bereitstellen. Manche Lehrenden bevorzugen sehr neue oder ‚graue‘ Literatur, die möglichst nah an den Praxisproblemen ist. Alles in allem wird die Theorie in erster Linie als Unterstützung für das Verständnis der Praxisprobleme herangezogen.

Ein interessanter Punkt, der von Lehrenden diskutiert wurde, war die *Variabilität* der Veranstaltungen. Zum Teil wurden LLAs schon viele Jahre angeboten, so dass die Veränderbarkeit und Anpassungsfähigkeit der Formate wie der Inhalte ein wichtiger Aspekt war, um das LLA an neue Gegebenheiten anzupassen. Dabei gingen diese Anpassungen oft über die Aktualisierung von Lerninhalten hinaus und beinhalteten auch die Anpassung an neue Studierendengruppen, an neue Praxispartner (inklusive der gezielten Ansprache neuartiger Praxispartner) sowie die Verwendung neuer Methoden (z. B. im Bereich der Online-Lehre oder die Nutzung von ‚academic podcasts‘). Je größer die Autonomie der Studierenden in LLAs, desto notwendiger ist eine hohe Variabilität, um sich an unterschiedliche Bedingungen anpassen zu können.

In Bezug auf die *Lernziele* ist die Unterscheidung zwischen kurzfristigen thematischen Lerninhalten einerseits und langfristigen Kompetenzen im Sinne von De Haans Gestaltungskompetenz andererseits von Bedeutung, wobei eine Überprüfung der langfristigen Lernziele schwer durchzuführen ist. Hier spielen auch Aspekte wie Visionsorientierung und vernetztes Denken eine Rolle. In der Regel können die Lehrenden nur auf die Projektergebnisse, Evaluationen und Reflexionsberichte der Studierenden zurückgreifen, die eine Beurteilung der Vermittlung kurzfristiger Lerninhalte ermöglichen, aber oft nicht so aussagekräftig sind in Bezug auf langfristige Kompetenzentwicklungen. Darüber hinaus können diese Beurteilungsgrundlagen auch etwas einseitig ausfallen, da sie in der Regel der Benotung dienen. Trotzdem kann man davon ausgehen, dass positive Rückmeldungen in den Evaluationen in Bezug auf Gruppenarbeit und Praxisprojekte (s. 4.1) von den Studierenden ehrlich gemeint sind und von positiven Erfahrungen zeugen. Inwiefern sie zugleich Kompetenzen vermitteln, kann mit den vorhandenen Instrumenten nur begrenzt überprüft werden.

BNE will die Wahrnehmung der Studierenden in Bezug auf *nachhaltige Entwicklung* verändern. Hier ist interessant zu sehen, dass alle Lehrenden den Eindruck haben, dass dieses Ziel erreicht wurde, teils gestützt auf positives direktes Feedback der Studierenden oder auf Evaluationen. Da wie bezüglich der Beurteilung der Kompetenzentwicklung auch hier die Evaluierung einer Wahrnehmungsveränderung schwierig ist, wurde als ein positives Instrument der Reflexionsbericht genannt, der zumindest eine ausführliche und differenzierte Rückmeldung der Studierenden bezüglich ihrer Lernerfahrungen im Bereich BNE darstellt. Manche Lehrende verzichten auch ganz auf Evaluationsinstrumente angesichts deren begrenzter Aussagekraft. Einige Lehrende halten fest, dass Studierende in der Regel zu Beginn der LLAs ein Nachhaltigkeitsverständnis haben, das sich auf die ökologische Dimension begrenzt, nach Abschluss der Veranstaltung aber ein breiteres, multidimensionales Verständnis von Nachhaltigkeit entwickelt haben, das sich stärker an den universalistischen normativen Vorstellungen eines guten Lebens für alle orientiert und somit den SDGs näher kommt.

Zu den institutionellen Rahmenbedingungen, die die Lehrenden gestalten, gehört die *Gewinnung von Praxispartnern*. Dabei greifen sie überwiegend auf existierende Netzwerke zurück. Schneeballeffekte durch die Mitwirkung in Nachhaltigkeitsprojekten führen zu einer Erweiterung der Netzwerke. Manche Lehrende gehen aktiv auf Praxispartner zu und schlagen ihnen Projekte vor. Besonders herausfordernd

ist die Gewinnung von Praxispartnern aus dem Bereich der Wirtschaft. Hier spielt Zeit als Ressource eine zentrale Rolle. Außerdem können hier auch Zielkonflikte entstehen, da Marktteilnehmer sich an Gewinnen orientieren und für sie nützliche Projekte durchführen wollen, während beispielsweise Service Learning gemeinnützige Projekte zum Ziel hat. Ebenso kann die Problematik von ‚Greenwashing‘ bei marktorientierten Praxispartnern auftreten.

Je nach LLA müssen Praxispartner unterschiedliche Anforderungen erfüllen (z. B. lokaler Akteur, um für Studierende leicht erreichbar zu sein, oder englischsprachig, wenn überwiegend internationale Studierende das LLA besuchen, usw.). Für alle spielt aber Verlässlichkeit und Vertrauen sowie direkte Kommunikation eine große Rolle. Insgesamt berichten die Lehrenden von überwiegend positiven Rückmeldungen der Praxispartner auf ihre Projekterfahrungen.

Schließlich stellt die Lehre von BNE auch eine *Lernerfahrung für die Lehrenden* dar. Die meisten Lehrenden sind schon bevor sie BNE-Veranstaltungen durchgeführt haben, mit Nachhaltigkeitsthemen konfrontiert gewesen oder haben hierzu gearbeitet. Dennoch berichten alle, dass die Lehre in diesem Bereich ihre Wahrnehmung und ihre Haltung in Bezug auf Nachhaltigkeit verändert hat, etwa durch den Kontakt mit Praxispartnern, die Lernprozesse anstoßen und Spezialwissen einbringen und die Netzwerke erweitern. BNE-Lehre ist damit ein kontinuierliches Lernerlebnis nicht nur für Studierende, sondern auch für die Lehrenden, die nicht nur ihr Wissen über Nachhaltigkeit erweitern, sondern explizit auch ihre Wahrnehmung von Nachhaltigkeitsproblemen und die damit verbundenen Lehrstrategien.

5. Interpretation der Ergebnisse und Fazit

Aus den Evaluationsergebnissen der studentischen Befragung kann man festhalten, dass sich die theoretischen Überlegungen insofern bestätigt haben, als sich auch empirisch anhand der Rückmeldungen der *Studierenden* zeigt, dass ein gelingender Ansatz für BNE von realen Problemen in der Lebenswelt der Studierenden ausgehen muss (1), die sie nicht nur (aber auch) intellektuell betreffen und daher für ihre praktischen Erfahrungen und damit für ihre Motivation sich zu engagieren von Bedeutung sind, auch wenn sich diese nicht nur auf ihre lokale Lebenswelt beziehen müssen. Weiterhin zeigt sich, dass LLAs, die gelingende BNE-Lernerfahrungen implizieren, den Studierenden auch die Möglichkeit geben sollten, sich mit der Welt auseinanderzusetzen und mit vielfältigen und unterschiedlichen Interessen und Perspektiven in Kontakt zu kommen (2). Schließlich müssen die Lernenden die Möglichkeit erhalten, zu kommunizieren, sich zu beteiligen und in kollektive Entscheidungsprozesse einzugreifen (3). Der Aspekt der Gruppenarbeit und der gemeinsamen Entscheidungsfindung wurde von den Studierenden als der wichtigste Lernaspekt beschrieben.

Bezüglich der *Praxispartner* lassen sich deren Ergebnisse in den folgenden drei Punkten zusammenfassen: (1) Die praktischen Erfahrungen und die engagierten Mitarbeiter*innen der Praxispartner tragen die Begleitung der Studierenden. Dabei sehen sich die Praxispartner des StuFu Nachhaltigkeit gut gerüstet für die Begleitung von studentischen Projekten. Die organisatorische Verfasstheit der Praxispartner mit ihren internen Kommunikationsstrukturen zur Umsetzung von nachhaltigem Engagement und ihre in der Regel stark engagierten Mitarbeiter*innen, die mit ihrem persönlichen Know-how die Studierende begleiten können, bieten vielfältige Ansatzpunkte für die praktische Umsetzung von Projekten zur nachhaltigen Entwicklung. Nachhaltigkeit als gelebte Praxis, die sämtliche Organisationsabläufe durchdringt, und eine interne inhaltliche Auseinandersetzung mit diesen Themen durch die Praxispartner könnte noch weiter intensiviert werden.

(2) Für die gelingende Zusammenarbeit mit den Studierenden werden beim Projekteinstieg die kommunikativen Grundlagen gelegt, die den Studierenden Mitgestaltungsmöglichkeiten eröffnen. Beim Eintritt in die praktische Projektarbeit legen die Praxispartner mit der Etablierung des kollegialen „Du“ und mit dem Aufzeigen von vielfältigen Anknüpfungspunkten für die Umsetzung studentischer

Ideen auf verschiedenen Ebenen der Projektgestaltung (Ziel, inhaltliche Ausrichtung) einen wichtigen Ansatzpunkt für das gemeinsame Lernen. Die Verwirklichung von Teilhabe und Partizipation aller an der Projektumsetzung kann als Ausgangspunkt für eine gelingende Realisierung bezeichnet werden. Auch die aktive Einbringung studentischer Ideen zur Erweiterung, Veränderung und Bereicherung des Projektangebotes erscheinen für einen gemeinsamen Start als wichtig.

(3) Allerdings wird der kommunikative Austausch zwischen Praxispartnern und Studierenden zu Nachhaltigkeit wie auch für die Projektumsetzung bisher kaum in Wert gesetzt. Vielmehr konzentriert sich die Interaktion auf die Handlungsebene der Projekte, die für sehr positive Erfahrungen sorgen. Allerdings wäre es für die Kompetenzentwicklung der Studierenden wichtig, diese Erfahrungen auch zu artikulieren und Projektschritte stärker diskursiv vorzubereiten und zu diskutieren, um eine kritisch-emanzipatorische BNE zu realisieren. Wie ist der gemeinsame Austausch zu nachhaltiger Entwicklung in Gang zu setzen? Bedarf es eines initialen Impulses für die gemeinsame Auseinandersetzung von Studierenden und Praxispartnern mit der Frage „Was verstehe ich unter Nachhaltigkeit?“? Benötigen Praxispartner, wenn sie sich als Bildungspartner in die Begleitung der Projektumsetzung einbringen, einen theoriegestützten Zugang zu ihren praxisorientierten Umsetzungsweisen der nachhaltigen Entwicklung, um sich auf dieser Grundlage mit den Studierenden auszutauschen? An dieser Stelle sollte in Zusammenarbeit mit den Praxispartnern über geeignete Strategien gesprochen werden, um die Kommunikation mit den Studierenden in diesen Punkten zu verbessern. Festhalten kann man aber auch hier, dass das Element der Praxisorientierung und der Handlungsfähigkeit in realen Projekten zentral ist für eine positive Bewertung der LLA.

Schließlich zeigen die Ergebnisse der Befragung der Lehrenden auch die Bedeutung von Praxis (1), Gruppenarbeit (Autonomie, Kommunikation und Diversität) (2), Flexibilität und Wahrnehmungsfähigkeit (3) für gelingende BNE auf. Auch hier bestätigen sich die theoretischen Überlegungen einer pragmatistischen Bildungstheorie wie auch einer kritisch-emanzipatorischen BNE, die Gestaltungskompetenzen betont. Dabei zeigt sich aber auch, dass es kein Patentrezept für gelingende BNE gibt, sondern dass LLAs, die eine gute BNE umsetzen, eine Gemeinschaftsleistung unterschiedlicher Partner (Studierender, Lehrender und Praxispartner) sind, die situativ an konkrete Problemlagen angepasst werden muss, kommunikative Prozesse erfordern und im Idealfall zu positiven Lernerfahrungen für alle Beteiligten führt. Diese Lernerfahrungen implizieren die Entwicklung zu mündigen Bürgern und Bürgerinnen in gerechten, demokratischen Gesellschaften auf einer Erde, deren planetare Grenzen mit Blick auf heutige wie künftige Generationen beachtet werden.

Literaturverzeichnis

Baltes, Anna Maria/Hofer, Manfred/Sliwka, Anne (Hg.) (2007): Studierende übernehmen Verantwortung. Service Learning an deutschen Universitäten, Weinheim und Basel: Beltz.

BNE-Portal-Hochschulen (o. J.): Bildung für nachhaltige Entwicklung, Portal des Bundesministeriums für Bildung und Forschung, Link: <https://www.bne-portal.de/bne/de/einstieg/bildungsbereiche/hochschule/hochschule.html>, zuletzt abgerufen am 01.01.2024.

BNE-Portal-Weltaktionsprogramm (o. J.): Das UNESCO-Weltaktionsprogramm BNE in Deutschland, Link: <https://www.bne-portal.de/bne/de/nationaler-aktionsplan/das-unesco-weltaktionsprogramm-bne-in-deutschland/das-unesco-weltaktionsprogramm-bne-in-deutschland.html>, zuletzt abgerufen am 01.01.2024.

Cochran, Molly (Ed.) (210): The Cambridge Companion to Dewey. Cambridge et al.: Cambridge University Press.

De Haan, Gerhard (2006): The BLK '21' programme in Germany: a 'Gestaltungskompetenz'-based

model for Education for Sustainable Development, in: Environmental Education Research, 12, 1: 19–32.

De Haan, Gerhard (2008): Gestaltungskompetenz als Kompetenzkonzept der Bildung für nachhaltige Entwicklung, in: Bormann, Inka/de Haan, Gerhard (Hg.): Kompetenzen der Bildung für nachhaltige Entwicklung. Operationalisierungen, Messungen, Rahmenbedingungen, Befunde, Wiesbaden: Verlag für Sozialwissenschaften: 23-43.

De Haan, Gerhard (2009): Bildung für nachhaltige Entwicklung, Hintergründe, Legitimation, und (neue) Kompetenzen, Programm Transfer-21 – Bildung für nachhaltige Entwicklung, Berlin: Freie Universität Berlin.

Dewey, John (1993 [1916]): Demokratie und Erziehung. Eine Einleitung in die philosophische Pädagogik, aus dem Amerikanischen von Erich Hylla, hrsg. und mit einem Nachwort versehen von Jürgen Oelkers, Weinheim/Basel: Beltz.

Dewey, John (1988 [1939]): Creative Democracy – The Task Before Us, in: Boydston, J. A. (Ed.) The Later Works: 1925-1953, Vol. 14. Carbondale and Edwardsville: Southern Illinois University Press.

Ekardt, Felix (2010): Das Prinzip Nachhaltigkeit. Generationengerechtigkeit und globale Gerechtigkeit, München: Beck.

English, Andrea R. (2017): Experience and Thinking: Transforming our Perspective on Learning. On Chapter 11: Experience and Thinking, in: Waks, Leonard J./English, Andrea R. (Eds.): John Dewey's Democracy and Education. A Centennial Handbook, New York: Cambridge University Press.

Hansen, David T. (2006): Preface, in: Hansen, D. T. (Ed.): John Dewey and Our Educational Prospect. A Critical Engagement with Dewey's Democracy and Education. Albany: State University of New York Press.

Hansen, David T. (2017): Foreword, in: Waks, Leonard J./English, Andrea R. (Eds.): John Dewey's Democracy and Education. A Centennial Handbook, New York: Cambridge University Press.

Hoch N (Hg.) (2020): Keine Nachhaltigkeit ohne Hochschulen – keine Hochschulen ohne Nachhaltigkeit. Positionspapier. Online: <https://www.hochn.uni-hamburg.de/downloads/2020-05-27-positionspapier.pdf>, zuletzt abgerufen am 06.01.2024.

Hollstein, Bettina/Tänzer, Sandra/Thumfart, Alexander (Hg.) (2013): InnoNet Bildung für nachhaltige Entwicklung. Gemeinsam Nachhaltigkeit gestalten. Das Innovationsnetzwerk BNE und das Studium Fundamentale. Nachhaltigkeit als Impulsgeber für vernetztes Handeln, Universität Erfurt, online: https://www.uni-erfurt.de/fileadmin/Hauptseiten/Universitaet/Nachhaltigkeit/Broschuere_InnoNet_BNE_Uni_Erfurt.pdf, zuletzt abgerufen am 06.01.2024.

Hollstein, Bettina/Singer-Brodowski, Mandy (2015): Netzwerk im Wandel – Qualitätsentwicklung von BNE in der Erfurter Bildungslandschaft, in: Fischbach, Robert/Kolleck, Nina/de Haan, Gerhard (Hg.): Auf dem Weg zu nachhaltigen Bildungslandschaften. Lokale Netzwerke gestalten, Wiesbaden: Springer VS Verlag: 147-168.

Hollstein, Bettina/Tziminadis, João (2024): 'Learning by Doing' in Higher Education. Empirical Insights into Education for Sustainable Development, in: Revista Ibero-Americana de Estudos em Educação (submitted).

Knight Abowitz, Kathleen (2017): "A Mode of Associated Living": The Distinctiveness of Deweyan Democracy, On Chapter 7: The Democratic Conception in Education, in: Waks, Leonard J./English, Andrea R. (Eds.): John Dewey's Democracy and Education. A Centennial Handbook, New York: Cambridge University Press.

Mittelstraß, Jürgen (2006): The Future of the University and the Credibility of Science and Scholarship, in: Ethical Perspectives, 13, 2: 171-189.

Nachhaltigkeitszentrum Thüringen (2018): Das Thüringer Qualitätssiegel Bildung für nachhaltige Entwicklung (BNE), hrsg. von Zukunftsfähiges Thüringen e.V., online: https://nhz-th.de/files/NHZ/Inhalte-Freigabe/Engagieren/BNE/Qualitaetssiegel/Downloads/2018_BNE-Qualitaetssiegel.pdf, zuletzt abgerufen am 06.01.2024.

Netzwerk n e.V. (Hg.) (2018): Zukunftsfähige Hochschulen gestalten. Beispiele des Gelingens aus Lehre, Forschung, Betrieb, Governance und Transfer. Berlin. online: https://netzwerk-n.org/wp-content/uploads/2022/08/ONLINE_Print_Version_GoodPracticeSammlung2018_netzwerk_n_OnlineVersion-1.pdf, zuletzt abgerufen am 06.01.2024.

Öhman, Johan/Sund, Louise. A. (2021): Didactic Model of Sustainability Commitment, in: Sustainability, 13 (6), 3083, <https://doi.org/10.3390/su13063083>.

Rieckmann, Marco (2012): Future-oriented higher education: Which key competencies should be fostered through university teaching and learning? Futures, 44: 127–135.

Rosa, Hartmut/Henning, Christoph (2018): The Good Life Beyond Growth. New Perspectives, London, New York: Routledge.

Rud, A. G. (2017): Giving Form and Structure to Experience, On Chapter 3: Education as Direction, in: Waks, Leonard J./English, Andrea R. (Eds.): John Dewey's Democracy and Education. A Centennial Handbook, New York: Cambridge University Press.

Schneidewind, Uwe/Singer-Brodowski, Mandy (2013): Transformative Wissenschaft: Klimawandel im deutschen Wissenschafts- und Hochschulsystem. Marburg: Metropolis.

Scott, W. A. H. (2011): Sustainable schools and the exercising of responsible citizenship—A review essay, in: Environmental Education Research, 17: 409–423, <https://doi.org/10.1080/13504622.2010.535724>.

Singer-Brodowski, Mandy (2016): Studierende als GestalterInnen einer Hochschulbildung für nachhaltige Entwicklung. Selbstorganisierte und problembasierte Nachhaltigkeitskurse und ihr Beitrag zur überfachlichen Kompetenzentwicklung Studierender, Reihe Umweltkommunikation, Band-Nr. 8, Berlin: Berliner Wissenschaftsverlag.

Thayer-Bacon, Barbara (2017): Healing Splits: Dewey's Theory of Knowing, On Chapter 25: Theories of Knowledge, in: Waks, Leonard J./English, Andrea R. (Eds.). John Dewey's Democracy and Education. A Centennial Handbook, New York: Cambridge University Press.

TMUEN (Thüringer Ministerium für Umwelt, Energie und Naturschutz) (Hg.) (2018): Die Thüringer Nachhaltigkeitsstrategie 2018, Erfurt.

UN Goals (o. J.): The 17 Goals, online: <https://sdgs.un.org/goals>, zuletzt abgerufen am 05.01.2024.

UNESCO (2014): Shaping the future we want: UN Decade of Education for Sustainable Development (2005-2014). Final report. Paris: UNESCO, online: <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000230171>, zuletzt abgerufen am 06.01.2024.

UNESCO (2021): Bildung für nachhaltige Entwicklung. Eine Roadmap, online: <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000379488>, zuletzt abgerufen am 06.01.2024.

UNESCO BNE (o. J.): Bildung für nachhaltige Entwicklung, online: <https://www.unesco.de/bildung/bildung-fuer-nachhaltige-entwicklung>, zuletzt abgerufen am 05.01.2024.

Vare, Paul (2022): The Competence Turn, in: Vare, P./Lousselet, N./Rieckmann, M. (Eds.):

Competences in Education for Sustainable Development. Critical Perspectives, Cham: Springer.

Vare, Paul/Scott, W. (2007): Learning for a Change: Exploring the Relationship Between Education and Sustainable Development, in: Journal of Education for Sustainable Development, 1 (2): 191-198. DOI: 10.1177/097340820700100209.

Waks, Leonard J. (2017a): Introduction to Part I, in: Waks, Leonard J./English, Andrea R. (Eds.): John Dewey's Democracy and Education. A Centennial Handbook, New York: Cambridge University Press.

Waks, Leonard J. (2017b): Learning by Doing and Communicating, On Chapter 1: Education as a Necessity of Life, in: Waks, Leonard J./English, Andrea R. (Eds.): John Dewey's Democracy and Education. A Centennial Handbook, New York: Cambridge University Press..

Waks, Leonard J./English, Andrea R. (Eds.) (2017): John Dewey's Democracy and Education. A Centennial Handbook, New York: Cambridge University Press.

Zukunftsfähiges Thüringen e. V. (2023): Projekt: KLIMA-N. Bericht zur Befragung der Praxispartner des StuFu-Nachhaltigkeit, (Bearbeiter: Martin Abramowski).

Konzeptentwicklung: Die treibhausgasneutrale Liegenschaft in öffentlicher Hand am Beispiel der Hochschule Hof

Oliver Stark¹, Michael Dölz¹, Johannes Kluck¹, Tobias Plessing¹

¹Institut für Wasserstoff- und Energietechnik (iwe), Hochschule Hof, Hof

1. Abstract

Vor dem Hintergrund des steigenden Drucks, die Ziele zur Reduzierung von Treibhausgasen gemäß des bayerischen und des Bundes-Klimaschutzgesetzes zu erreichen, verfolgt die Hochschule Hof proaktiv eine nachhaltige Ausrichtung und leitet entsprechende Maßnahmen ein. Eine detaillierte gebäudescharfe Analyse des Ist-Zustandes bildet die Grundlage für die Konzeptentwicklung. Diese untersucht Schlüsselfaktoren wie Energieverbrauchsreduktion, Photovoltaik mit oder ohne Batteriespeicher, saisonale Energiespeicherung mittels Wasserstoff- sowie eine regenerative Wärmeversorgung. Ein zentraler Fokus liegt auf der verstärkten Integration regenerativer Energien am Campus der Hochschule Hof. Die Hochschule Hof setzt auf gezielte Identifikation und Nutzung von Potenzialen, um nicht nur die Energieeffizienz zu steigern und Kosten zu reduzieren, sondern auch den ökologischen Fußabdruck zu minimieren und ihre Nachhaltigkeitsbemühungen zu intensivieren. In der vorliegenden Publikation werden primär die Strom- und Wärmeströme am Campus Hof identifiziert, wobei der Schwerpunkt auf einer eigenständigen Stromversorgung mittels Wasserstoffelektrolyse und seiner Rückverstromung über eine Brennstoffzelle liegt.

2. Einführung

Am 31. August 2021 hat die Bundesregierung das Bundes-Klimaschutzgesetz novelliert, um die Klimaschutzvorgaben zu verschärfen und das 1,5 °C Klimaziel zu erreichen. Das Ziel der Treibhausgasneutralität bis 2045 wurde im Gesetz verankert und, wie vom Bundesverfassungsgericht gefordert, wurden Meilensteine zum Erreichen der Treibhausgasneutralität definiert (gemäß § 3 Absatz 2 KSG). Das CO₂-Minderungsziel für 2030 beträgt 65% und bis 2040 mindestens 88 % bezogen auf das Referenzjahr von 1990 (gemäß § 4 Anlage 3 KSG).

Auch der öffentlichen Hand obliegt auf dem Weg zur Klimaneutralität eine Vorbildfunktion, und strebt an, bis 2030 bereits klimaneutral organisiert zu sein (gemäß § 15 Absatz 1 KSG). Entsprechend hat das Umweltministerium im Jahr 2021 eine Koordinierungsstelle Klimaneutrale Bundesverwaltung (KKB) geschaffen. Die Handlungsfelder der KKB umfassen Liegenschaften, Kantinen, Mobilität, Beschaffung, Veranstaltungen und Kompensationen [1]. Aber auch die einzelnen Bundesländer haben zum Teil mit ambitionierteren Zielen als der Bund ihre Landes-Klimaschutzgesetze entsprechend adaptiert. In Bayern ist demzufolge im Januar 2023 die erste Novelle des Bayerischen Klimaschutzgesetzes in Kraft getreten. Dieses Gesetz legt verbindliche Ziele fest, die Bayern im Bereich des Klimaschutzes erreichen soll (gemäß Artikel 2 BayKlimaG). Gleichzeitig hat die Bayerische Staatsregierung im begleitenden Klimaschutzprogramm rund 150 konkrete Maßnahmen beschlossen, um die gesetzlichen CO₂-Minderungsziele umzusetzen. Bis zum Jahr 2040 strebt Bayern die Klimaneutralität des gesamten Freistaats an. Die Staatsregierung selbst plant bereits im Jahr 2023 klimaneutral zu agieren, was eine Vorreiterrolle auf politischer Ebene signalisiert und den Weg für andere Institutionen weisen soll (gemäß Artikel 3 BayKlimaG). Obwohl die bayrischen Hochschulen nicht direkt der unmittelbaren Staatsverwaltung zugeordnet sind, die bis 2028 ihre Klimaneutralität erreichen soll, sind sie gemäß der Bayerischen Rahmenvereinbarung der Hochschulen für den Zeitraum 2023–2027 dennoch verpflichtet, einen bedeutenden Beitrag zur Verwirklichung der Klimaschutzziele der Bayerischen Staatsregierung zu leisten (gemäß Teil 2 Kapitel 1 Art.2 Absatz 7 BayHIG). Die Hochschulen werden aktiv dazu beitragen und hierzu ein transparentes Instrument zur hochschulspezifischen Treibhausgasbilanzierung (THG-

Bilanzierung) entwickeln. Des Weiteren wird in der Betriebsführung der Hochschulen darauf abgezielt, den Ressourcenverbrauch so weit wie möglich zu reduzieren, unter Berücksichtigung der standortspezifischen Besonderheiten. Durch die Umstellung auf eine ressourceneffiziente Betriebsführung sollen die Hochschulen einen Beitrag zur nachhaltigen Entwicklung leisten und den Umweltschutz aktiv fördern.

In diesem Kontext ergreift die Hochschule Hof proaktiv die Initiative mit dem hochschuleigenen Projekt "Energieautarke Hochschule Hof". Zu diesem Zweck wurde das Institut für Wasserstoff- und Energietechnik (iwe) betraut, eine Analyse des Istzustandes zu erstellen und mögliche Versorgungskonzepte zu entwickeln, die die Hochschule unabhängiger von externen Energiequellen macht und eine möglichst eigenständige Energieversorgung realisiert. Ein zentraler Schwerpunkt des Projekts liegt dabei auf der Intensivierung des Einsatzes regenerativer Energien am Campus der Hochschule Hof. Das innovative Energieversorgungskonzept sieht die Entwicklung neuer und effizienter Methoden zur Erzeugung, Speicherung und Nutzung von Energie vor. Durch eine gezielte Identifikation und Ausschöpfung von Potenzialen möchte die Hochschule Hof nicht nur ihre Energieeffizienz steigern, sondern auch gleichzeitig Kosten reduzieren. Stand bis dato das Verhältnis der Treibhausgasreduktion und der Wirtschaftlichkeit im Fokus gibt es jetzt ein definiertes CO₂-Minderungsziel, an dem sich die Maßnahmen messen lassen müssen.

3. Analyse der Verbrauchsstrukturen und Darstellung des Istzustandes

3.1 Verbrauchsstruktur am Campus Strom und Wärme

Die Hochschule Hof erstreckt sich derzeit über mehrere Standorte, darunter Hof, Kronach, Münchberg und Selb. Der Hauptcampus in Hof hat seit der Gründung 1994 stetig an Fläche gewonnen und umfasst Verwaltungs- und Institutsgebäude. In Münchberg ist die Gebäudestruktur am Campus äußerst heterogen und setzt sich aus unterschiedlichen Industrie- und Verwaltungsgebäuden zusammen, die im Zeitraum des frühen bis mittleren 20. Jahrhunderts bis zum Jahr 2021 errichtet wurden. Aufgrund laufender Umbau- und Sanierungsaktivitäten wird der Münchberger Standort in der folgenden Untersuchung jedoch nicht berücksichtigt. Ebenso werden aufgrund des Mietverhältnisses und der geringen Flächengrößen die beiden Außenstandorte Kronach und Selb, die erst im Jahr 2022 bezogen wurden, nicht in die Analyse des Energieverbrauchs einbezogen. Der Fokus liegt somit auf dem Hauptcampus in Hof und dessen Strukturen.

Aufgrund historischer Entwicklung und der direkten Nachbarschaft ist im Bereich der Energieversorgung eine Zusammenarbeit zwischen den beiden Hochschulen der „Hochschule für angewandte Wissenschaften“ (HAW) und der „Hochschule für den öffentlichen Dienst“ (HföD) entstanden. In den 90er Jahren wurde die HAW sowohl wärmeseitig an das bestehende Nahwärmenetz der HföD als auch stromseitig an dem Mittelspannungsnetzverknüpfungspunkt angeschlossen. Als Ergebnis ist der Standort nicht direkt an die öffentliche Strom- und Gasversorgung angeschlossen.

Die Wärmeversorgung erfolgt über zwei BHKW, die an der HföD verortet sind und mit Erdgas als primärem Energieträger betrieben werden. Im Zuge der Erweiterung des Gebäudebestandes wurden entsprechend die Netzinfrastruktur der HAW an die neuen Gegebenheiten angepasst. Seit dem fungiert die HföD als Energielieferant für die HAW. Soweit eine Abrechnung über Zähler möglich war, wurde dies entsprechend abgerechnet. Falls eine Aufteilung über Zählererfassung nicht möglich war, wurden Verbrauchs- oder Flächenverhältnisse für die Aufteilung und Kostenermittlung zu Grunde gelegt (bspw. Gebäude D, das sich im Areal der HföD befindet). Im Jahr 2022 wurde nun eine eigene Zählerstruktur am Campus installiert. Abbildung 1 zeigt den Lageplan mit den verschiedenen Liegenschaften. Das Mobilgebäude 2, welches Ende 2023 in Betrieb genommen wurde, sowie das Gebäude H, das sich zum aktuellen Zeitpunkt noch im Bau befindet, wurden nachträglich in das Luftbild integriert. Aus der Draufsicht wird deutlich, wie sich der Campus sukzessive von Gebäude A über Gebäude B und C bis hin zum Gebäude G erweitert hat.

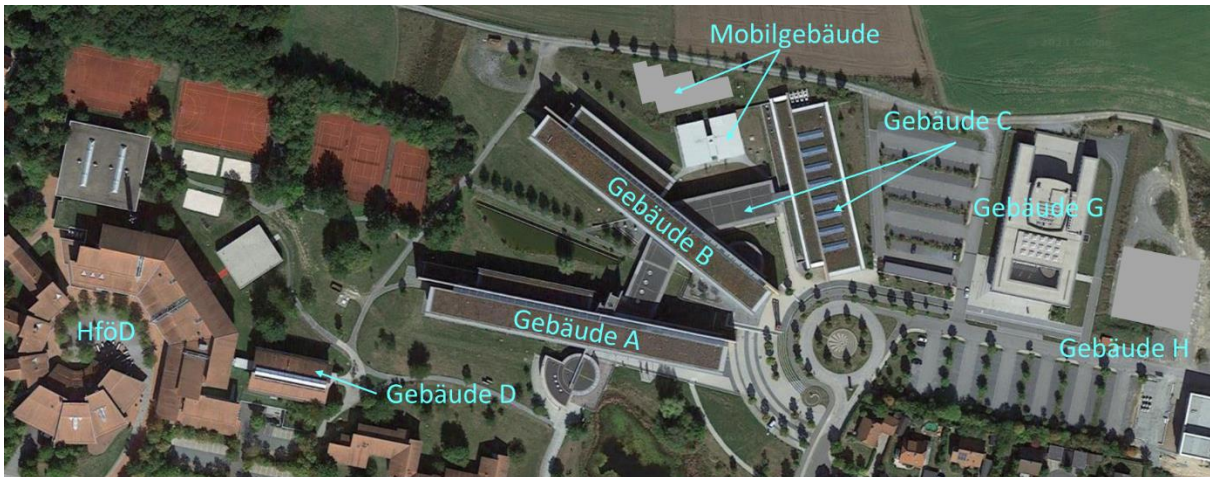


Abb. 1 Lageplan der Hochschule Hof

Für den Betrieb des Campus Hof wird im Wesentlichen Wärme und elektrische Energie benötigt. Die Wärme wird verwendet, um die Räume zu konditionieren und teilweise Trinkwarmwasser bereitzustellen. Die Versorgung mit elektrischer Energie erfolgt standortübergreifend durch das vorgelagerte Stromnetz. Eine Ausnahme bilden drei PV-Anlagen auf den Dächern der Gebäude C mit 12,3 kWp, Gebäude D mit 5,0 kWp und Gebäude G mit 5,0 kWp am Campus Hof. In den neunziger Jahren wurde durch einen bayerischen Landtagsbeschluss festgelegt, dass bei Neubaumaßnahmen ein prozentualer Anteil der TGA-Gewerkkosten für die Installation von PV-Systemen vorgesehen wird. Folglich sind die PV-Anlagen durch die Initiierung des Bauministeriums und nicht durch Hochschulinitiative entstanden. Da ihre Gesamtleistung weniger als 25 kWp beträgt, wird ihr Beitrag zur Versorgung der Hochschule Hof als vernachlässigbar eingestuft. Die elektrische Energie dient der Beleuchtung, der EDV, der Versorgung des Heizungssystems mit Hilfsenergie sowie dem Betrieb unterschiedlichster Laboreinrichtungen. Nennenswert sind zudem die beiden Rechenzentren und Serverräume in den Gebäuden A und G, die das ganze Jahr über entsprechenden Strom- und auch Kühlbedarf vorweisen. Nachfolgend werden durch vereinfachte Schemen die Verteilung der Elektrotechnik (vgl. Abb. 2) sowie die hydraulische Wärmeverteilung (vgl. Abb. 3) dargestellt.

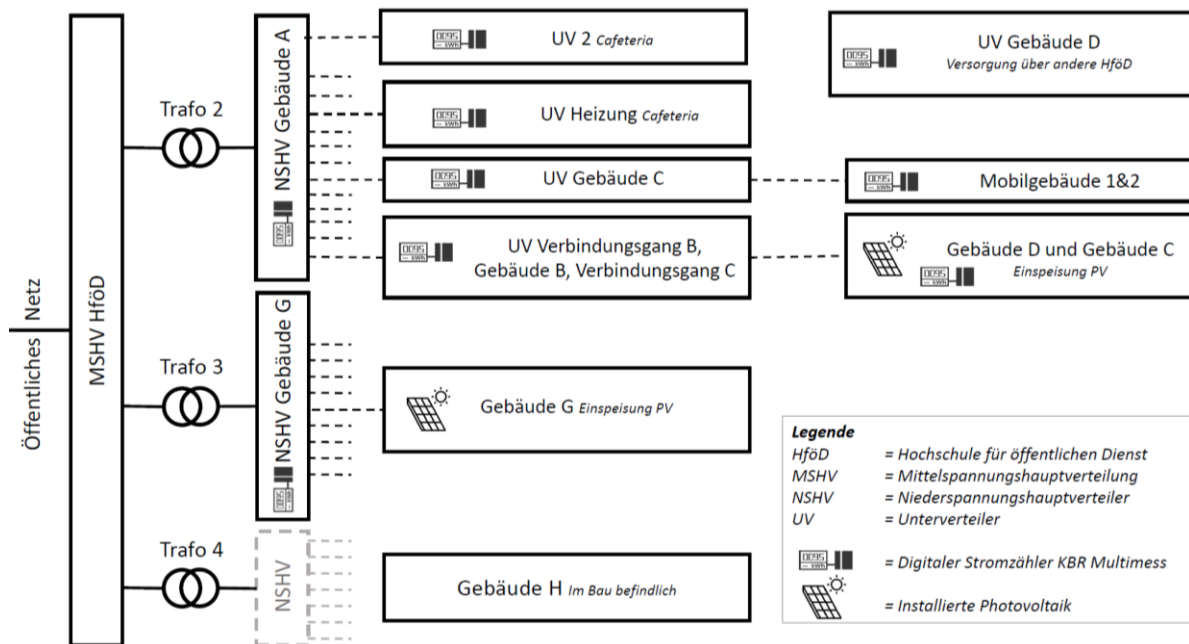


Abb. 2 Elektroverteilung des Campus Hof

Wie in Abb. 2 ersichtlich wurde die Hochschule an das MS-Netz der HföD angegliedert und entsprechend über einen eigenen Trafo (Trafo 2) angeschlossen. Im Laufe der Campuserweiterung wurden die nachfolgenden Gebäudeteile B und C an den Niederspannungshauptverteilung im Gebäude A in Reihe geschaltet. Mit dem Bau des Gebäudes G wurde der Auslastungsgrad der Trafokapazität von Trafo 2 überschritten. Daher wurde ein separater Trafo (Trafo 3) speziell für das neue Gebäude G in Betrieb genommen, insbesondere aufgrund der hohen Anschlussleistungen, die ein Rechnerzentrum erfordert. Auch das Gebäude H wird wegen hoher technischer Anforderungen nach Fertigstellung einen eigenen MS-Anschluss besitzen. Des Weiteren sind in der Darstellung die Einspeisepunkte der Photovoltaikanlagen in das Hochschulnetz verzeichnet.

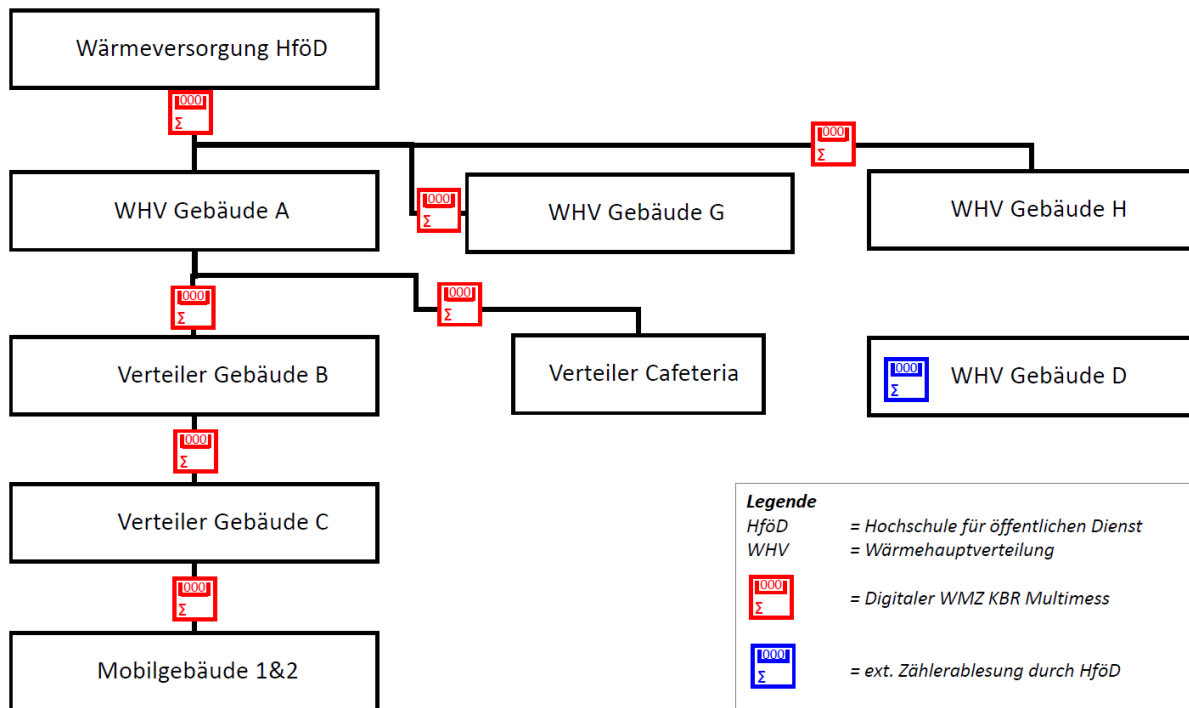


Abb. 3 Wärmeverteilung des Campus Hof

In Analogie zur Elektroverteilung wurde die Wärmeverteilungsinfrastruktur am Campus Hof schrittweise von dem Netzübergabepunkt der HföD aus aufgebaut. Aufgrund von Kapazitätsbeschränkungen des Wärmehauptverteilers und Platzmangel im Gebäude A war es jedoch nicht möglich, diesen für die Gebäude G und zukünftig für das Gebäude H zu erweitern. Daher wurden zwei separate Stichleitungen errichtet, um diese beiden Gebäude zu versorgen. Unter hydraulischen Gesichtspunkten ist die aktuelle Verschaltung der Wärmeversorgung am Campus nicht optimal gelöst.

3.2 Analyse der Wärme- und Stromverbräuche

Ende 2022 erfolgte der Einbau von Messtechnik der Firma KBR am Campus Hof. Zuvor wurde nur an der HföD monatlich an einem zentralen Zähler gemessen. Diese neue Messtechnik ermöglicht eine detaillierte Auflösung der Verbräuche auf Gebäudeebene, was zu einer präziseren und umfangreicheren Erfassung der Energieverbrauchswerte führt. In Abb. 4 ist die geordnete Jahresdauerlinie für den Strombedarf des gesamten Campus Hof dargestellt. Im Diagramm ist zu erkennen, dass eine Höchstlast von 364 kW auftritt. Auf Grund fehlenden Normierung von Spitzenlast, Mittellast und Grundlast haben sich standardisierte Werte in der Praxis etabliert. Der Spitzenlastbereich erstreckt sich von etwa zwei Dritteln der Höchstlast bis zur Höchstlast selbst, also von 243 kW bis 364 kW. Insgesamt beträgt die Spitzenlastdauer 710 Stunden. Die Grundlast liegt in der Praxis üblicherweise bei etwa zwei Dritteln des betrachteten Zeitraums, was in einem vollständigen Jahr 5840 Stunden entspricht. Der tabellarische Wert an dieser Stelle beträgt 115,12 kW. Der Bereich zwischen

Grund- und Spitzenlast wird als Mittellast bezeichnet und repräsentiert den durchschnittlichen Stromverbrauch.

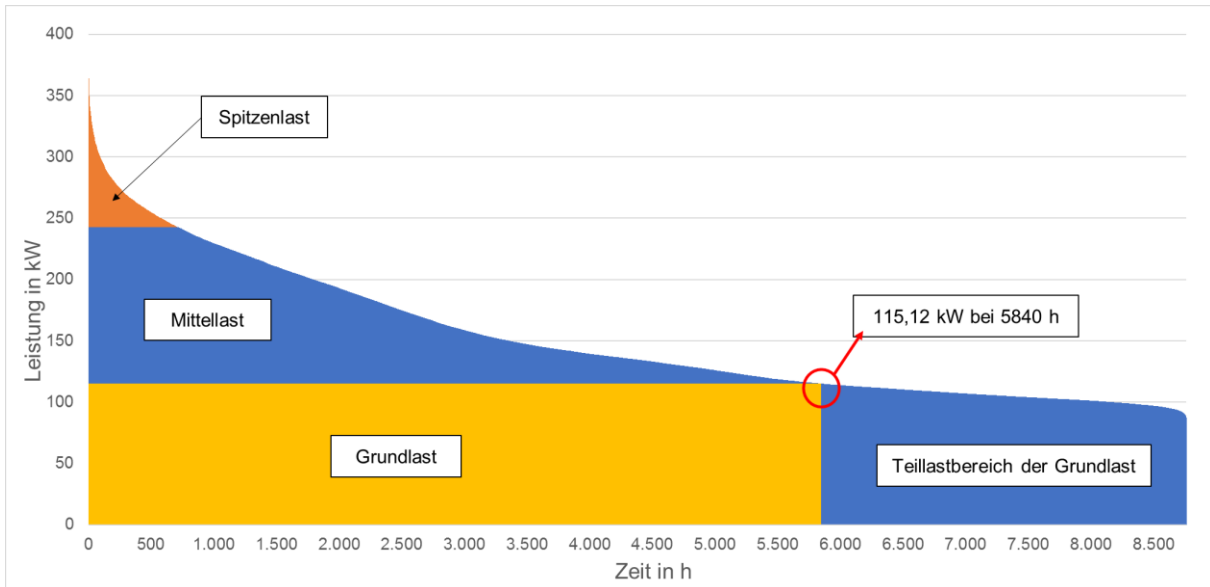


Abb. 4 Geordnete Jahresdauerlinie für den Strombedarf des Campus Hof

Der durchschnittliche Stromverbrauch der Hochschule in den Jahren 2017-2022 beläuft sich auf 1.181 MWh pro Jahr. Der spezifische Stromverbrauch beträgt dabei 76,2 kWh pro Quadratmeter. Besonders hervorhebend ist das Gebäude G, das trotz nur etwa 12 % der Gesamtfläche ca. 24,8 % des Gesamtstromverbrauchs der Hochschule im Jahr 2023 ausmacht. Diese Auffälligkeit lässt sich auf das Vorhandensein eines eigenen Rechenzentrums in Gebäude G zurückführen und erfordert eine gesonderte Bewertung.

Der absolute und spezifische Wärmeverbrauch der einzelnen Liegenschaften am Campus Hof für das Jahr 2023, stellt sich wie folgt dar:

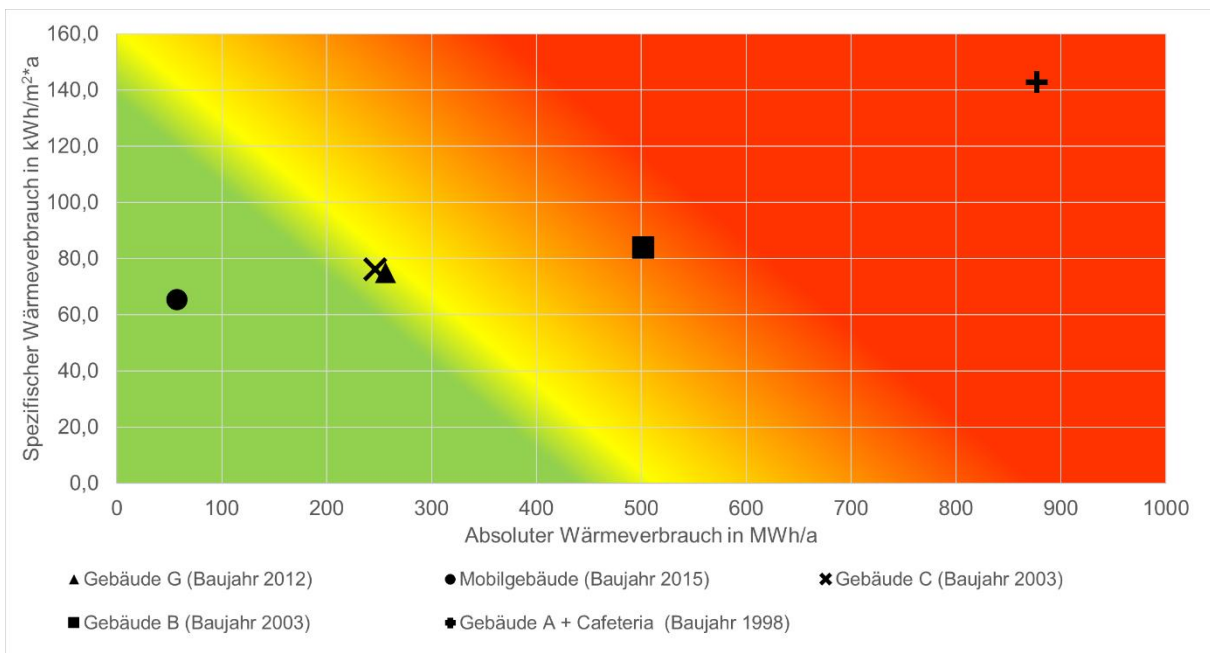


Abb. 5 Absolute und spezifische Wärmeenergieverbräuche für die Gebäude am Campus Hof (2023)

Die aktuelle Situation der Wärmeverbräuche der Gebäude wird durch eine Aufstellung der spezifischen und absoluten Werte deutlich. Mit Ausnahme von Gebäude G steigt der spezifische Wärmeverbrauchswert mit dem Gebäudealter. Die beiden größten Gebäude, Gebäude A mit einer Cafeteria (876.930 kWh/a) und Gebäude B (501.670 kWh/a), sind folglich die größten absoluten Wärmeverbraucher. Trotz seines jungen Baualters weist Gebäude G einen hohen spezifischen Wärmeverbrauch auf.

Der durchschnittliche Wärmebedarf des Campus Hof zwischen 2017 und 2022 beträgt etwa 2.026 MWh pro Jahr, und der spezifische Wärmeverbrauch liegt bei 130,7 kWh pro Quadratmeter. Gebäude D ist aufgrund abrechnungstechnischer Aspekte über die HföD nicht im Schema aufgeführt.

3.3 Zusammenstellung der spezifischen Wärme- und Stromverbräuche

Die nachstehende Tabelle gibt einen Überblick über die Hauptnutzungsarten, Baujahre, Nettogrundflächen und spezifischen Energieverbräuche der einzelnen Gebäude des Campus Hof.

Tabelle 1: Zusammenstellung der spezifischen Verbräuche der Liegenschaften des Campus Hof

Gebäude- bezeichnung	Hauptnutzung	Baujahr	NGF in m ²	Spezifischer Wärmeverbrauch 2023 In kWh/m ² *a	Spezifischer Stromverbrauch 2023 In kWh/m ² *a
Gebäude A + Cafeteria	Verwaltungs- & Lehrgebäude	1998	6143	142,7	68,2
Gebäude B + Verbindungsang B + Verbindungsang C	Verwaltungs- & Lehrgebäude	2003	5.501 480 982	83,9	48,2
Gebäude C	Verwaltungs- & Maschinenhalle	2003	2.249	76,1	59,6
Gebäude D*	Verwaltungs- gebäude	1994	1.731	95,8	22,3
Gebäude G	Institutsgebäude	2012	3.413	75,0	94,5
Gebäude Mobil 1	Bürogebäude	2015	878	65,3	22,9

*Werte für das Abrechnungsjahr 2022

Die spezifischen Verbräuche für Strom und Wärme des Campus Hof sind in Tabelle 1 zusammengefasst. Alle Gebäude sind an das Nahwärmenetz der HföD angeschlossen. Bezüglich des Wärmeverbrauchs zeigt sich eine deutliche Tendenz: Mit steigendem Alter der Gebäude steigt in der Regel auch der spezifische Wärmeverbrauch, mit einer Ausnahme des Gebäudes G. Grundsätzlich deutet dies darauf hin, dass die energetische Qualität der Gebäudehüllen seit dem Bau nicht oder nur geringfügig verbessert wurde. Beim Gebäude G kommt erschwerend hinzu, dass aufgrund von akut bestehenden Baumängeln und dem schlechten Raum/Oberflächenverhältnis der spezifische Wert höher liegt. Ein besonderer Punkt ist der spezifische Wärmeverbrauch im Gebäude A, das einen hohen Anteil unbeheizter Flächen aufweist, da es vollständig unterkellert ist. Dies führt zu entsprechend hohen Transmissionswärmeverlusten, die den spezifischen Wärmeverbrauch erhöhen.

Hinsichtlich des spezifischen Strombedarfs variieren die Verbräuche stark abhängig von der Nutzung der Gebäude. Hierbei fällt besonders das Gebäude G auf, das das Institut für Informationssysteme beherbergt und mit Serverräumen ausgestattet ist, was zu einem vergleichsweise hohen Stromverbrauch führt.

4. Treibhausgasneutrale Stromversorgung

4.1 Einführung der benötigten Technologien PV, el. Speicher, Wasserstoffinfrastruktur

Bereitstellung elektrische Energie durch eine Photovoltaik-Anlage

Für die Planung der PV-Anlagen am Campus Hof wurden monokristalline Module vom Typ JAM54S30 mit einer Effizienz von 20,5 % angenommen. Monokristalline PV-Module sind zu über 90% Standard in der Ausführung moderner großflächiger PV-Anlagen. Lithium-Ionen-Akkus haben sich als moderne elektrochemische Stromspeicher am Markt etabliert. Für die Simulationen wurden der Neoom Block BL 3.1 des Herstellers NEOOM ausgewählt.

Wasserstoff erzeugen, speichern und umwandeln

Die Herstellung von Wasserstoff kann über die Elektrolyse von Wasser oder die Dampfreformierung von Erd- oder Flüssiggas erfolgen. Letzteres ist der häufigste kommerzielle Weg, führt aber zur Bildung von Kohlenstoffmonoxid (CO) als Nebenprodukt, das in der Atmosphäre Treibhausgas bildet. Die Dampfreformierung erfordert komplexe Anlagen, die erst ab einer gewissen Größe wirtschaftlich tragfähig betrieben werden können. Die Wasserelektrolyse ist derzeit die einzige am Markt verfügbare Technologie für eine CO₂-freie Produktion¹ von Wasserstoff. Mit Hilfe von elektrischer Spannung wird Wasser in Sauerstoff und Wasserstoff aufgespalten. Die Zersetzung besteht aus zwei Teilreaktionen, wobei sich an dem Minuspol Wasserstoff und an dem Pluspol Sauerstoff bildet, im Verhältnis zwei zu eins. Die Erzeugung von 1 kg H₂ erfordert eine Energiemenge von 65,65 kWh (analog dazu sind für 1 m³ H₂ 5,9 kWh erforderlich).

Die drei verbreitetsten Verfahren für die Herstellung von Wasserstoff sind die alkalische Elektrolyse (AEL) mit flüssigem, basischem Elektrolyten, die PEM-Elektrolyse (Polymer-Elektrolyt-Membran) mit festem Polymerelektrolyten und die Hochtemperatur-Wasserdampf-Elektrolyse (SOEC - Solid Oxide Electrolyzer Cell), bei der ein Festoxid als Elektrolyt zum Einsatz kommt [2]. Die Druckelektrolyse lässt im Vergleich zu einem Betrieb bei Atmosphärendruck kompaktere Bauweisen zu und bietet die Option, den erzeugten Wasserstoff direkt in das Erdgasnetz einzuspeisen. Einen Vergleich der wichtigsten Parameter der drei Technologien zeigt die Tabelle 2.

Tabelle 2: Parametervergleich verschiedener Elektrolyseur-Technologien, eigene Darstellung nach [6], [7], [8], [9]

Eigenschaften	Einheit	AEL	PEM	SOEC
Wirkungsgrad	%	62 - 82	65 – 82	65 – 85
Stromdichte	A/cm ²	0,2 - 0,5	2	0,46 – 1,3
Leistungsbereich	MW	bis 130	bis 6	0,018
Temperaturbereich	°C	40 – 90	20 -100	700 – 1000
Teillastbereich	%	20 – 100	5 – 100	-
Lebensdauer	h	bis 90.000	bis 50.000	< 10.000
Spezifischer Energieverbrauch	kWh/m ³	4 – 5	4 - 8	< 4
Produktionsrate pro Einheit	Nm ³ /h	1.000	460	< 6
Gasreinheit	%	>99,5	99,99	99,9
Betriebsdruck	bar	1 – 30	5 – 30	< 25
Investitionskosten	€/kW	1.000 – 1.200	1.860 - 2.320	2.200 – 6.500

Die Speicherung von Wasserstoff bei stationären Anlagen kann mit ortsfesten oder beweglichen Druckbehälter erfolgen. In Abhängigkeit der erforderlichen Speicherkapazität kann aufgrund der

¹ Unter Einsatz elektrischer Energie durch den Einsatz regenerativer Energietechnik

geringen volumetrischen Energiedichte von Wasserstoff zusätzlich eine Verdichtung sinnvoll sein. Druckspeicher können in Nieder- (bis 200 bar), Mittel- (200 - 500 bar) und Hochdruckspeicher (500 - 1000 bar) unterteilt werden [3]. Druckgasflaschen werden von vielen Herstellern als kompaktes Bündel angeboten, bestehend aus 12 Flaschen mit einem Gesamtvolumen von 600 Litern. Diese können modular erweitert werden. Eine übliche 50-Liter-Flasche fasst in Abhängigkeit des Verdichtungsdruckes 8,92 Nm³ bei 200 bar und 12,58 Nm³ bei 300 bar [4]. Bei der Verdichtung nehmen die Verluste mit steigendem Verdichtungsdruck zu und liegen zwischen 7 - 12 % [5]. Alternativ zu Flaschenbündel können auch Druckgascontainer eingesetzt werden. Gegenüber von Gasflaschen bzw. Flaschenbündeln weisen diese ein besseres Verhältnis von Volumen und Speicherkapazität auf. Ein Container kann ein Normvolumen von 3.745 m³ speichern und ersetzt damit 25 Flaschenbündel.

Durch den Einsatz von Brennstoffzellen wird die chemische Energie des Wasserstoffs in elektrische und thermische Energie umgesetzt. Diese besitzen im Vergleich zu Verbrennungsmotoren einen hohen elektrischen Wirkungsgrad (> 50 %) und arbeiten emissionsfrei sowie geräusch- und wartungsarm. Der Gesamtwirkungsgrad bei Nutzung thermischer und elektrischer Energie beträgt 80 %. Brennstoffzellen erzeugen durch die elektrochemische Oxidation von Wasserstoff und Reduktion von Sauerstoff sowohl Strom und Wärme. Als Nebenprodukt entsteht Wasser. Brennstoffzellen bestehen aus Anode, Kathode und einem Elektrolyten, der die Elektroden trennt. Der Aufbau wird in Abb. 6 anhand einer PEM-Brennstoffzelle dargestellt.

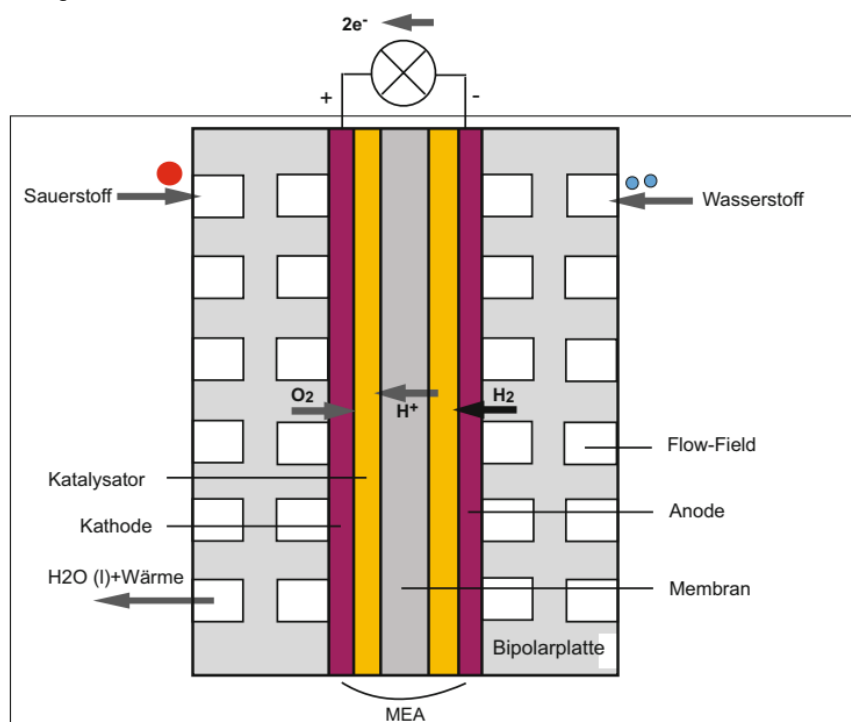


Abb. 6 Aufbau einer PEM-Brennstoffzelle [7]

Wasserstoff wird der Anode zugeführt und löst sich dort in atomarem Wasserstoff auf. Zwischen Anode und Kathode befindet sich eine dünne Membran mit Sulfonsäure-Gruppen, die den Durchtritt von Protonen ermöglicht und den von Elektronen blockiert. Die dauerhafte Befeuchtung der Membran ist essenziell, damit die Wasserstoffionen über die Sulfonsäure-Gruppen durch die Membran wandern können. Die freiwerdenden Elektronen stehen als Ladungsträger für die Versorgung eines externen Stromkreises zur Verfügung. In der Kathode findet eine Reduktion des Sauerstoffes statt, welcher Elektronen aufnimmt und mit jeweils zwei H⁺-Ionen Wasser bildet. Da es sich um eine exotherme Reaktion handelt, wird Wärme frei. Durch den Ionenfluss wird der Membran Wasser entzogen, weshalb eine Rückdiffusion möglich sein muss, um eine Austrocknung zu verhindern [6].

Es gibt verschiedene Arten von Brennstoffzellen, die je nach Elektrolytmaterial und Betriebsbedingungen unterschiedliche Eigenschaften aufweisen, siehe dazu Tabelle 3. Die PEMFC weist eine hohe Effizienz bei kompakter Bauweise, leichter Skalierbarkeit und langer Lebensdauer auf. Ein weiterer Vorteil gegenüber der AFC ist der Betrieb mit Luft. Zudem ist der Elektrolyt beständig gegen Korrosion [5]. Die SOFC erfordert aufgrund der hohen Arbeitstemperaturen mehr technischen Aufwand für den Betrieb. AFC, PAFC und MCFC haben durch technische Probleme bei Feldtests in den letzten Jahren international etwas an Bedeutung verloren [7]. Damit eine PEMFC lange Laufzeiten erreichen kann, sollte die Leistung auf einen möglichst konstanten Wert eingestellt werden. Eine stark dynamische Betriebsweise wirkt sich zusammen mit vielen Start-Stopp Vorgängen negativ auf die Lebensdauer aus [8].

Tabelle 3: Vergleich verschiedener Brennstoffzellen-Typen, eigene Darstellung nach [7], [9]

Eigenschaften	Einheit	PEMFC ³	AFC ³	PAFC ³	MCFC ³	SOFC ²
Elektrischer Wirkungsgrad	%	bis 70 (O ₂) bis 50 (Luft)	bis 70 (O ₂) bis 55 (Luft)	bis 53 (Luft)	55 - 65 (Luft)	52 - 55 (Luft)
Oxidator	-	Polymermembran	Kalilauge	Phosphorsäure	Gemisch aus Lithium- und Kaliumkarbonat	Oxidkeramik
Leistungsbereich	MW	0,0005 – 0,4	< 0,1	> 10	< 100	< 100
Temperaturbereich	°C	50 – 90 (NT) 120 – 200 (HT)	60 – 90	160 – 220	600 - 700	700 – 1.000
Lebensdauer	h	bis 60.000	5.000 – 8.000	30.000 – 60.000	20.000 – 40.000	< 90.000

4.2 Vorstellung des entwickelten Simulations-Modells

Eine Photovoltaikanlage soll als Hauptenergiequelle für die Energiebereitstellung am Campus der Hochschule Hof eingesetzt werden. Für die Ermittlung der möglichen Erzeugerleistung auf dem Hochschulgelände wurden Park-, Dach-, und Fassadenflächen hinsichtlich ihres Potentials untersucht. Die ermittelte potentielle Anlagenleistung entspricht in etwa 1.500 kWp. Mit Hilfe der Software Polysun SPT wurde anschließend für jede Teilanlage mit individueller Neigung, Ausrichtung, Verschattung usw. der Ertrag simuliert.

Die Datengrundlage für die Simulation beruht neben den Ertragswerten aus Polysun SPT auf Messwerten des Energiesystems der Hochschule Hof. Die Rohdaten wurden für die Simulation bzgl. des Zeitschritts sowie der Maßeinheiten harmonisiert. Die Daten liegen anschließend im Format .xlsx der Software Excel vor und wurden im nächsten Schritt in Matlab importiert.

Nach dem Import der Rohdaten in Matlab wird für jeden Parameter eine Matrix bestehend aus einem Datenvektor und einen Zeitvektor erstellt. Der Zeitvektor gibt den Zeitpunkt in Sekunden an, besitzt eine Schrittweite von 900 Sekunden und umfasst ein Jahr (31.536.000 s). Neben der Erstellung der Matrizen für die Simulation dient der Matlab-Editor als Eingabefenster für den Anwender, um Variablen für die verwendeten Komponenten, Parametervariationen vorzugeben und die Auswertung sowie Darstellung der Simulationsergebnisse durchzuführen.

Im Anschluss an die vorbereitenden Schritte erfolgt die Simulation durch Ausführen des Simulink-Modell. Während der Simulation berechnet Simulink die Ausgangsgrößen zu verschiedenen Zeitpunkten basierend auf Eingangsdaten, Simulationsparametern und den erstellten Modellen. Die

² PEMFC = Proton Exchange Membrane Fuel Cell; AFC = Alkaline Fuel Cell; PAFC = Phosphoric Acid Fuel Cell; MCFC = Molten Carbonate Fuel Cell; SOFC = Solid Oxide Fuel Cell

Ergebnisse werden automatisch abgespeichert und grafisch ausgewertet. In Abb. 7 sind die beschriebenen Datenpfade von der Aufnahme und Auswertung in EXCEL über den Transfer nach MATLAB und die anschließende Verarbeitung über das Simulink-Modell dargestellt.

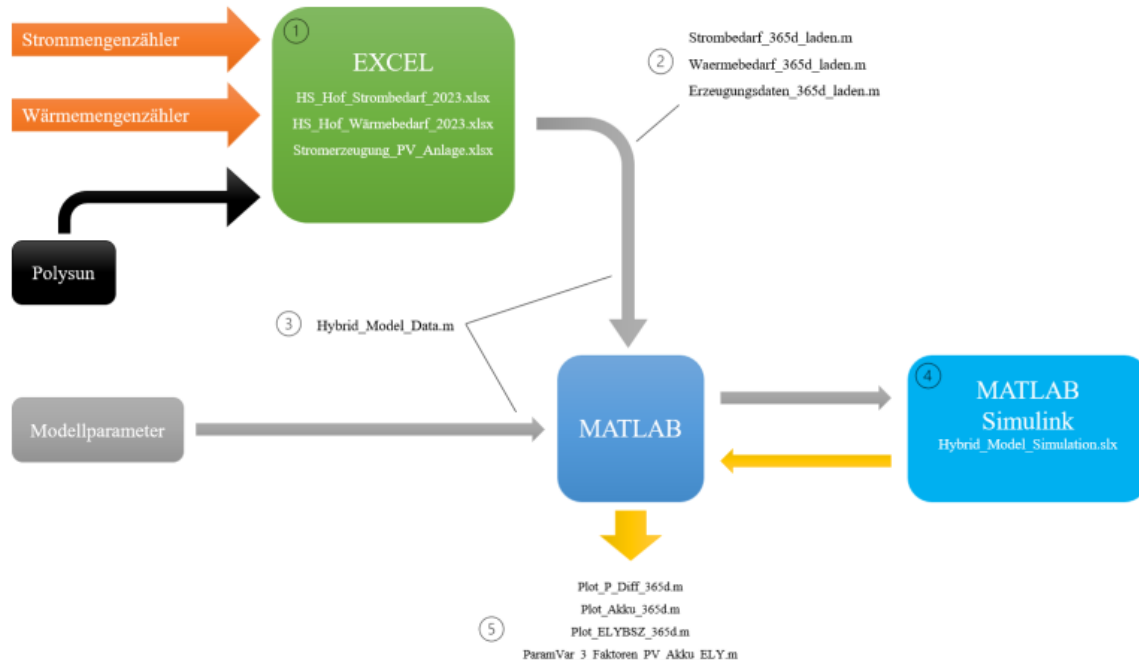


Abb. 7 Übersicht Informationsfluss von der Rohdatenbereitstellung bis zur Ausgabe der Simulationsparameter

Das Subsystem „Strom- und Wärmebedarf“ sowie „Stromerzeugung“ organisiert die Übertragung der Daten aus dem Workspace nach Simulink. Das Ziel der Simulation ist, die Einspeisung in das öffentliche Netz sowie den Bezug aus dem Stromnetz zu minimieren und damit den Autarkiegrad und den Eigenverbrauch zu maximieren. Für diese Zielstellung ist die wichtigste Variable die Differenzleistung zwischen dem Verbrauch und der Erzeugung innerhalb der Bilanzgrenzen der Hochschule. Das Subsystem „Differenzleistung“ berechnet u.a. diesen Wert und gibt diese an die nachgeschalteten Subsysteme weiter.

Die Priorisierung der eingesetzten Speichertechnologie wird im Modell statisch, durch die Verschaltung der Subsysteme vorgegeben. Die Subsysteme „Akku“ und „ELY-Druckspeicher-BSZ“ bilden die Komponenten für die Speicherung der elektrischen Energie mit Hilfe eines Lithium-Ionen-Akkus oder in Form von Wasserstoff nach. Wird mehr Energie erzeugt als verbraucht wird zuerst der Akku geladen und anschließend Wasserstoff erzeugt und eingespeichert. Ist der Verbrauch größer als die Erzeugung kommt es zur Entladung der Speicher, bei der die selbe Priorisierung besteht wie bei der Beladung. Die Wasserstoffnutzung erfolgt Wärme und Strom geführt, d.h. der Wasserstoff wird erst in Wärme und Strom umgewandelt, wenn beide Energieformen benötigt werden. Bei der Modellierung der Bauteile wurden die minimale und die maximale Be- und Entladeleistung sowie die Speicherkapazität markverfügbarer Produkte nachgebildet.

In dem letzten Subsystem werden Autarkiegrad (AUT) und Eigenverbrauch (EV) für jedes der genannten Haupt subsysteme berechnet und ausgegeben. Zusätzlich werden weitere relevante Ergebnisse direkt visualisiert, wie zum Beispiel die ein- und ausgespeicherte Energie des Akkumulators, die erzeugte Wasserstoffmenge oder die Stromerzeugung der Brennstoffzelle (vgl. Abb. 8).

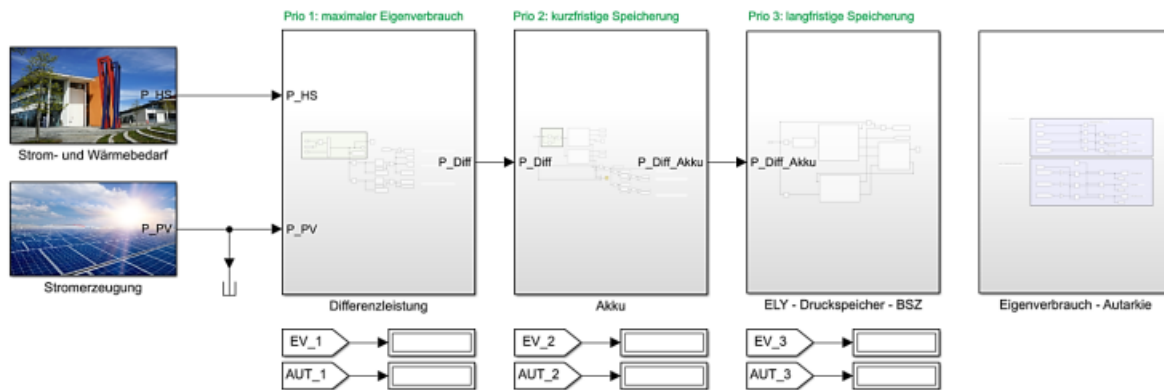


Abb. 8 Darstellung der Modellierung in Simulink

4.3 Auswertung und Darstellung der Simulationsergebnisse

Mit Hilfe des vorgestellten Simulationsmodells wurde eine Parametervariation durchgeführt. Diese ermöglicht es, den Einfluss definierter Parameter auf die Energiekennzahlen wie Autarkiegrad und Eigenverbrauch zu untersuchen. Für die durchgeführte Parametervariation wurden folgende Parameter festgelegt:

- Leistung der Photovoltaikanlage (0 bis 6.000 kW)
- Nennkapazität des Akkumulators (0 bis 3.980 kWh)
- Betriebsleistung des Elektrolyseurs (0 bis 660 kW)

Die Leistung der Brennstoffzelle ist an die Grundlast angepasst und wurde nicht variiert. Die Lade- und Entladeleistung des Batteriespeichers ist abhängig von der Nennkapazität und passt sich über das erstellte Skript mit den Eingangsgrößen automatisch an. Bei Akku und Elektrolyseur handelt es sich um Herstellerangaben. Die PV-Anlage kann aufgrund der Module beliebig skaliert werden.

In der Abb. 9 sind die Ergebnisse der Parametervariation für den Autarkiegrad (1. Zeile) und dem Eigenverbrauch (2. Zeile) als konturfüllte Diagramme dargestellt. Die einzelnen Diagramme zeigen die Ergebnisse in Abhängigkeit der PV-Leistung und der Akkukapazität. Von links nach rechts steigt die Leistung des Elektrolyseurs an.

Die Diagramme in der Spalte 1 zeigen die Ergebnisse für eine Anlage ohne Wasserstoffnutzung. Bis zu einer PV-Anlagengröße von etwa 500 kWp haben zusätzliche Akkukapazitäten nur einen sehr geringen Einfluss auf den Autarkiegrad und den Eigenverbrauch. Die Erzeugerleistung übersteigt die Verbrauchsleistung der Hochschule nicht und nahezu 100 % der Energie wird selbst verbraucht. Ab 500 kW stellt sich das Maximum anhand des Verhältnisses zwischen PV-Leistung und Akkukapazität von 1 kWp/kWh ein.

Die Spalte 2 und Spalte 3 der Abb. 9 zeigen, dass sich die Wasserstoffkette erst ab einer PV-Leistung von 1.500 kW auf den Autarkiegrad auswirkt. Mit der Kombination von 3.000 kW Photovoltaik und 2.500 kWh Batteriespeicher, ist mit einem Elektrolyseur von 660 kW eine Steigerung des Autarkiegrades um 10 % auf 90 % möglich.

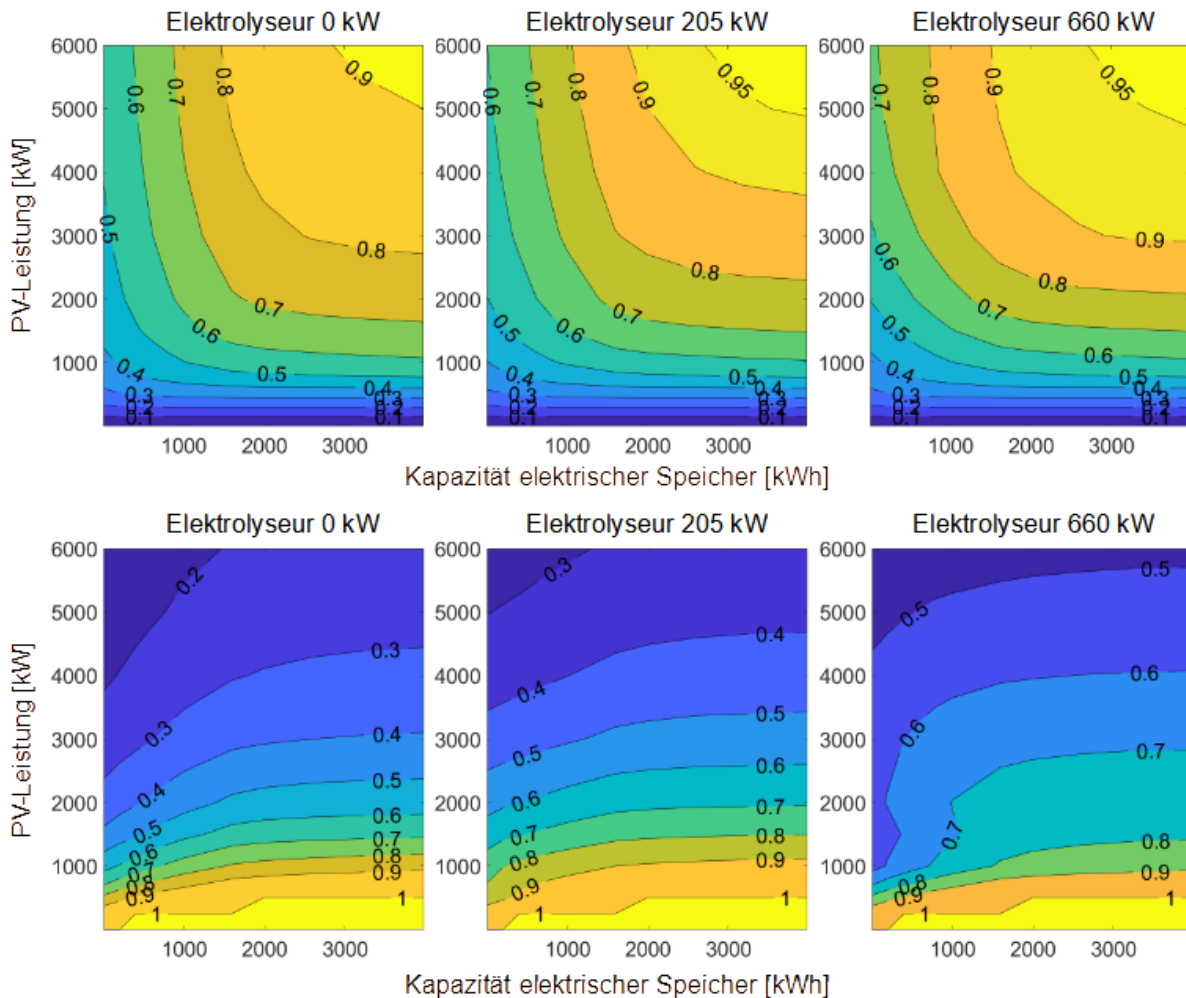


Abb. 9 Autarkiegrad (1. Zeile) und Eigenverbrauch (2. Zeile) in Abhängigkeit von PV-Leistung, der Kapazität des elektrischen Speichers sowie der Leistung des Elektrolyseurs

Das Eigenverbrauchsdiagramm in der Spalte 1 der Abb. 9 zeigt, dass bis zu einer PV-Leistung von 500 kWp der Eigenverbrauch unabhängig von der Akkukapazität nahezu 100 % beträgt. Wenn die PV-Leistung steigt, sinkt der Eigenverbrauch. Ein größerer Anteil der generierten Energie wird dann in das öffentliche Netz eingespeist. Zusätzliche Kapazitäten führen zu Steigerungen des Eigenverbrauchs, dieser Effekt verstärkt sich mit zunehmender PV-Leistung weiter. Die Diagramme der Spalten 1 bis 3 zeigen, dass zusätzliche Elektrolyseurleistung den Anteil der Nutzung des selbst erzeugten Stroms erhöht, sofern genügend Erzeugungsleistung vorhanden ist. Ein 660 kW-Elektrolyseur steigert den Eigenverbrauch beispielsweise erst ab einer Erzeugungsleistung von 1.500 kWp, da dann die notwendige Überschussleistung vorhanden ist. Für PV-Anlagen < 750 kWp erhöht sich der Eigenverbrauchsanteil durch den Betrieb des Elektrolyseurs nicht. Bei hohen Elektrolyseurleistungen ist im Bereich von PV-Leistungen zwischen 750 und 3.000 kWp bei Akkukapazitäten < 1.500 kWh ein steiler Verlauf der Konturen zu verzeichnen. Dort bewirkt die Änderung der PV-Leistung eine deutliche Veränderung des Eigenverbrauchs.

5. Zusammenfassung und Ausblick

Die Untersuchung verschiedener Energieoptionen zeigt, dass eine PV-Anlage und ein Batteriespeicher unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten keine lokale Autarkie ermöglichen. Hingegen erlaubt die Kombination einer 2,5-MWp-PV-Anlage mit einem 1.990-kWh-Akku und einem 500-kW-Elektrolyseur bei 7 Mio. € Investitionskosten einen energieoptimierten Betrieb mit 82 % Autarkiegrad und 70 % Eigenverbrauch. Eine kostenoptimierte Variante bestehend aus der Kombination einer 1-MWp-PV-Anlage mit einem 995-kWh-Akku ohne Wasserstoffkette bei 1,2 Mio. € Investitionskosten, was zu 50 % Autarkie und 74 % Eigenverbrauch führt. Ein System ohne Wasserstoffkette ermöglicht über 70 % Autarkie und 55 % Eigenverbrauch bei 1,84 Mio. €, mit einem deutlichen Kostenvorteil von mehr als 57 % gegenüber einem vergleichbaren System mit Wasserstoffkette. Insgesamt zeigt sich, dass das konzipierte System mit Wasserstoffkette nahezu vollständige Strom-Autarkie realisieren kann. Allerdings geht dies mit höheren finanziellen Aufwendungen einher, während ein System mit 80 % Netzunabhängigkeit deutlich kosteneffizienter ist. Besonders wirtschaftlich ist eine Kombination aus PV-Anlage und Batteriespeicher ohne Wasserstoff, die bei 50 % Autarkie den größten Mehrwert bietet. Es wird betont, dass Maßnahmen zur Stromeinsparung vor der Implementierung eines innovativen Energiesystems durchgeführt werden sollten, um die Systemkomponenten zu verkleinern und die Investitionskosten zu reduzieren.

Zukünftig soll die Simulation um 3 Aspekte erweitert werden. Es soll die Priorisierung der Technologien nicht statisch, sondern dynamisch erfolgen. Ein Solver entscheidet, welche Technologie eingesetzt wird und variiert selbständig die Parametergrößen. Ein weiterer Punkt umfasst den Betrieb des Elektrolyseurs. Aufgrund des schlechten Teillastverhaltens soll mit zwei Elektrolyseuren unterschiedlicher Leistungsklassen gearbeitet werden. Durch dieses Vorgehen können die PV-Überschüsse besser genutzt und die Menge an erzeugtem Wasserstoff erhöht werden. Da der Elektrolyseur zusammen mit der Brennstoffzelle die höchsten spezifischen Kosten aufweist, wäre für dieses Szenario eine Wirtschaftlichkeitsberechnung ausschlaggebend. Abschließend soll der Einfluss des Einsparpotential von 23 % gegenüber dem aktuellen Stromverbrauch der Hochschule, auf den Autarkiegrad und dem Eigenverbrauch untersucht werden.

Im Kontext der regenerativen Wärmeversorgung des Campus Hof stehen noch bedeutende Aufgaben an. Hierzu zählt der Einsatz einer Wärmepumpe, wobei die Orientierung an den maximalen Überschüssen der PV-Anlage im Winter von entscheidender Bedeutung ist. Es gilt, die Wärmepumpe strategisch zu positionieren und zu optimieren, um den bestmöglichen Nutzen aus den Winterüberschüssen zu erzielen. Im Rahmen der Optimierung der Wärmeversorgung, ist ein wichtiger Schritt die Auslegung eines Wärmespeichers. Diese Dimensionierung ist entscheidend für die Effizienz des gesamten Systems und erfordert eine genaue Analyse der zu speichernden Wärmemengen, der Speicherzeit und des Wärmebedarfs des Campus. Dies umfasst die Untersuchung unterschiedlicher Materialien, Technologien oder Speicherformen. Diese Aufgaben sind entscheidend für den Erfolg der regenerativen Wärmeversorgung und werden in zukünftigen Untersuchungen fortgeführt.

Abschließend sind die Maßnahmen auf die Standorte Münchberg, Kronach und Selb zu übertragen. Diese unterscheiden sich sowohl in Größe, Versorgungsstruktur und Bausubstanz von dem untersuchten Campus am Standort Hof.

Literaturverzeichnis

- [1] D. K. Röhling, „KKB - die Koordinierungsstelle Klimaneutrale Bundesverwaltung stellt sich vor,“ 2022.
- [2] dena und D. E.-A. GmbH, „Systemlösung Power to Gas: Chancen, Herausforderungen und Stellschrauben auf dem Weg zur Marktreife,“ dema, Berlin, 2015.
- [3] C. Wilke, „Optimale Dimensionierung von dezentralen, regenerativen Energieversorgungssystemen in Quartieren,“ Fakultät für Elektrotechnik und Informatik der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover, Hannover, 2020.
- [4] gasido, „Wasserstoff Bündel kaufen: Eigenschaften und Kosten,“ Lindenfield GmbH, [Online]. Available: <https://www.gasido.de/wasserstoff-buendel-kaufen-eigenschaften-und-kosten>. [Zugriff am 15.12.2023].
- [5] V. Quaschnig, Regenerative Energiesysteme, München: Hanser, 2022.
- [6] T. Schmidt, Wasserstofftechnik Grundlagen, Systeme, Anwendung, Wirtschaft, Herzberg: Hanser, 2020.
- [7] bayern-innovativ, „Brennstoffzellen - Typen, Anwendungen, Wirtschaftlichkeit,“ bayern-innovativ, [Online]. Available: www.bayern-innovativ.de/de/seite/brennstoffzellen-typen-anwendungen . [Zugriff am 15.12.2023].
- [8] R. Neugebauer, Wasserstofftechnologien, Springer Vieweg, 2022.
- [9] K. G. D. u. G. U. D. L. Greene, „Status and Outlook for the U.S. Non-Automotive Fuel Cell Industry,“ Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, 5244.

VR4energy – Entwicklung einer Virtual Reality-Anwendung für Schülerlabore zur Energiewende

Marius Wohlfahrtstätter, Prof. Dr.-Ing. Mario Adam

Zentrum für Innovative Energiesysteme (ZIES), Hochschule Düsseldorf

Abstract

Ziel des am ZIES durchgeführten Projektes war die Erstellung eines innovativen, attraktiven und lehrreichen Virtual-Reality (VR)-Formates als inhaltlich und didaktisch sinnvolle Erweiterung des Schülerlabors „Energiewende macht Schule“ für zwei wichtige Energiewendethemen: energetische Haussanierung und Bau von Photovoltaik-Anlagen. In Level 1 werden energetische Optimierungs- und Sanierungsmöglichkeiten in einem Einfamilienhaus ausfindig gemacht, Geräte mit hohem Energieverbrauch ausgetauscht sowie Gebäudesanierungen vorgenommen. In Level 2 wird eine Photovoltaikanlage aufgebaut zur Versorgung eines Einfamilienhauses, das bereits mit energieeffizienten Haushaltsgeräten und einer ökologischen Wärmeversorgung in Form einer elektrisch betriebenen Wärmepumpe ausgestattet ist. Im Verlauf des Projektes wurden in enger Zusammenarbeit mit den Softwareentwicklern die inhaltlichen Konzepte und die Spielmechanik entwickelt und die VR-Anwendung durch anwendernahe Tests fortlaufend optimiert. Parallel wurden die notwendigen Lehr- und Lernmaterialien erstellt und Maßnahmen zur Verbreitung der Projektergebnisse getroffen. Die entwickelte VR-Anwendung macht die darzustellenden Sachverhalte spielerisch und individuell erfahrbar und kommt bei den Teilnehmer:innen im Schülerlabor sehr gut an.

1. Einleitung

Um die junge Generation in eine umfangreiche und kritische Auseinandersetzung mit den Anforderungen und Gelingensbedingungen der Energiewende zu bringen und für MINT-Fächer im Allgemeinen zu begeistern, wurden im Rahmen verschiedener geförderter Projekte Tageskurse und Ferienprogramme für Schüler:innen aller Klassenstufen am ZIES konzipiert, erprobt und erfolgreich durchgeführt. Seit 2018 konnten so rund 200 Kurse realisiert werden. Behandelt werden dabei schwerpunktmäßig Themen rund um die erneuerbaren Energien sowie Klimawandel und Nachhaltigkeit im Allgemeinen.

Neuere Lerntheorien belegen, dass einfache Prozesse der Wissensvermittlung nicht zu einem vollständigen und langfristigen Lernerfolg ausreichen. In einer Zeit, in der Wissen durch Internet und Smartphone allzugänglich ist, rücken kreative Fähigkeiten in den Vordergrund. Deshalb stellen aktivierende, praxisbezogene Lehr-Lernelemente schon jetzt wichtige Bestandteile des Schülerlabors dar, die die individuelle Lebenswelt heutiger Schüler:innen berücksichtigen. Daneben umfasst das didaktische Konzept gezielte Medien- und Methodenwechsel, um den verschiedenen Kompetenzen der Schüler:innen gerecht zu werden und gleichzeitig die Aufmerksamkeit der Schüler:innen aufrecht zu halten. Die Kursangebote beinhalten derzeit Experimente, Planspiele, Kurzvorträge, Quiz-Formate und Hochschulerkundungen.

Um eine bestmögliche Inhaltsvermittlung zu erreichen, ist eine fortwährende und auf moderne Lehr- und Lernmethoden aufbauende Weiterentwicklung der Kurse wichtig. VR-Medien stellen vor allem im Bereich des praxisnahen Kompetenzerwerbs eine attraktive und inhaltlich äußerst sinnvolle Erweiterung des Schülerlabors „Energiewende macht Schule“ dar, welche über eine Vermittlung von reinem Fachwissen hinausgehen. In realitätsnahen Erlebnissen werden spielerisch Situationen und Fähigkeiten mit komplexen Sachverhalten erprobt, die sich mittels traditioneller Lerntechniken nur schwer vermitteln lassen. Entdeckendes, interaktives und emotionales Lernen kann mit VR umgesetzt und in einem

ganzheitlichen Lernerlebnis erlebt werden. Durch diesen sogenannten Immersionseffekt und die hohe Interaktivität der Anwendungen entsteht ein neues Lernerlebnis. VR-Bausteine eignen sich speziell dann, wenn praxisnahes Lernen in der Realität aufgrund hoher Kosten, Sicherheitsbedenken oder eines komplexen Themas nicht möglich ist.

Das Themenfeld Energiewende eignet sich im Besonderen für diese Art der Lernszenarien, da dort eine Vielzahl an denkbaren und sinnvollen VR-Lernszenarien möglich ist, wie beispielsweise die Durchführung von Maßnahmen zur energetischen Haussanierung, der Aufbau und die Wartung einer Windkraftanlage, die Auslegung und der Bau einer Solar- bzw. Wärmepumpenanlage und „hautnahe“ Erlebnisse rund um die Auswirkungen des Klimawandels, wie Meeresspiegelanstieg, Dürren oder Unwetter. Motivierende, interaktive und immersive Lernumgebungen stärken zudem im Idealfall die Begeisterung der Schüler:innen, für den Klimaschutz aktiv zu werden.

2. Stand des Wissens und der Technik

Lediglich an 4 % der Schulen sind VR-Medien vorzufinden. Auch in der akademischen Bildung findet VR bislang noch keine große Anwendung. Im Vergleich zu traditionellen Formen des Online-Lernens, wie E-Learning-Angeboten und Lernplattformen, ist die VR-Nutzung zu vernachlässigen [1]. International betrachtet ist ein weiterer Anwendungsbereich die berufliche Bildung [2]. Besonders bei der Bedienung von großen technischen Systemen wie Flugzeugen und Industrieanlagen, dem Erleben von Architektur und der Simulation von chemischen Reaktionen wird VR genutzt [3]. In Regelschulen findet VR bislang jedoch nur wenig Verbreitung. Die meisten verfügbaren VR-Angebote finden sich auf dem Spiele-, Militär- und Unterhaltungsmarkt und sind für Bildungsprozesse daher eher ungeeignet.

In App-Stores existiert eine Vielzahl von Anwendungen mit immersiven 360-Grad-Filmen bzw. VR-Erlebnissen. Die meisten dieser Angebote erlauben jedoch eher eine passiv-rezipierende Nutzung seitens der Anwender:innen und ermöglichen keine oder nur sehr eingeschränkt eine aktiv-konstruierende Nutzung der virtuellen Welten. Anwendungen aus dem Bereich der Explorationswelten erlauben den Lernenden meist zumindest, sich selbstgesteuert, im eigenen Tempo durch virtuelle Räume zu bewegen und Sachverhalte, Konzepte, Orte und historische Relikte zu erkunden. Auch im Energiesektor findet sich eine Vielzahl solcher 360°-Filme zur Wissensvermittlung. So entwickelte die HAW Hamburg in Kooperation mit weiteren Partnern ein Projekt zur virtuellen Begehung einer Windkraftanlage, in der Besuchern:innen die physischen Ausmaße der Anlage als auch technische Hintergrundinformationen vermittelt werden.

VR-Anwendungen, welche den eigenen Konstruktions- und Gestaltungsprozess der Lernenden in den Vordergrund stellen, finden sich im Bildungsbereich bislang nur wenige, was die Relevanz des Projektes unterstreicht.

3. Ergebnisse

Es wurde eine VR-Anwendung entwickelt, in welcher autonome Lernerfahrungen in immersiven VR-Trainingsumgebungen interaktiv, also aktiv-konstruierend genutzt werden können. Die Anwendung besteht aus zwei getrennt spielbaren Levels, welche im Zusammenspiel zwischen einer in der VR-Umgebung agierenden Person und einer weiteren Person, die wichtige Instruktionen aus einem digitalen Handbuch gibt, absolviert werden. Dabei werden in Level 1 in Teamarbeit beider Spieler:innen energetische Optimierungsmöglichkeiten in einem Einfamilienhaus ausfindig gemacht. Dies geschieht im Rahmen eines zeitlich begrenzten und mit Gamification-Elementen ausgestatteten Spiels. Die Person in der virtuellen Realität erkundet das Haus und entfernt durch interaktive Aktionen Geräte mit hohem Energieverbrauch und tauscht sie gegen effizientere Lösungen aus oder führt entsprechende energetische Sanierungen, wie beispielsweise Fassaden- oder Rohrdämmung, durch. In Abbildung 1

bis Abbildung 3 sind beispielhaft Interaktionsmöglichkeiten dargestellt. Die Person am Handbuch versorgt die Person in der virtuellen Realität hierbei mit notwendigen Informationen und gibt allgemeine Handlungshinweise. Zum Abschluss des Spiels erfährt das Team in Form einer leicht verständlichen Ergebnisdarstellung (Abbildung 4), ob die durchgeführten Handlungen zu einer Verbesserung oder sogar Verschlechterung der Treibhausgasemission geführt haben. Nach Level 1 tauschen die Spieler:innen Handbuch und VR-Brille.

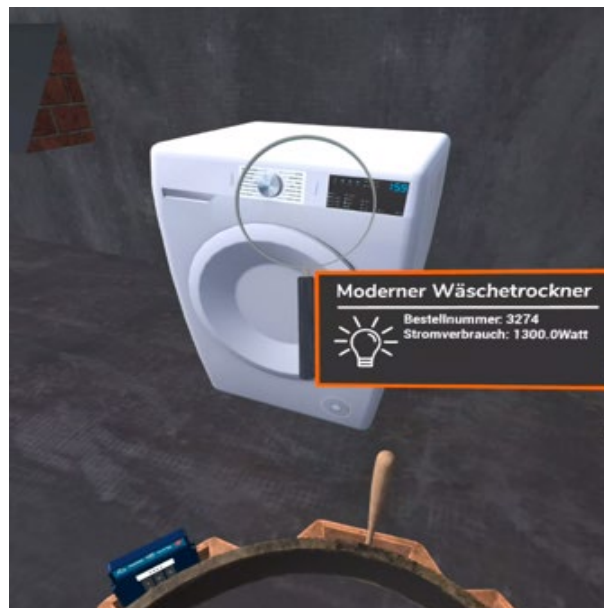


Abb. 1: Interaktionsmöglichkeit "Lupe" zur Ermittlung der Eigenschaften von Energie verbrauchenden Geräten



Abb. 2: Interaktionsmöglichkeit "Baseballschläger" zur Beseitigung von Altgeräten mit hohem Energieverbrauch



Abb. 3: Interaktionsmöglichkeit "Bestelleinheit" zur Beschaffung neuer, möglichst energiesparender Geräte

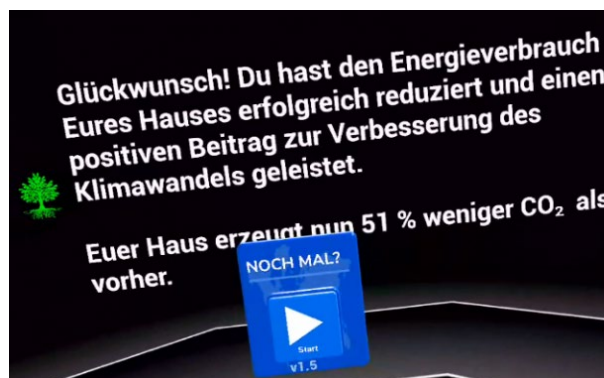


Abb. 4: Ergebnisdarstellung Level 1

In Level 2 wird eine Photovoltaikanlage aufgebaut zur Versorgung eines Einfamilienhauses mit elektrischer Energie, das bereits mit energieeffizienten Haushaltsgeräten und ökologischer Wärmeversorgung durch eine elektrisch betriebene Inverter-Wärmepumpe ausgestattet ist. Hierzu werden ebenfalls in Teamarbeit die benötigten Bauteile (PV-Module, Wechselrichter, Batterie) mithilfe des Handbuchs identifiziert und verbaut. Das Gameplay ist in Abbildung 5 und Abbildung 6 gezeigt. Es wird die Auslegung der PV-Anlage (Anzahl der Module) anhand des durchschnittlichen jährlichen Stromverbrauchs des Hauses bestimmt. Der VR-Spieler begeht das Haus und identifiziert mit der Lupe die jährlichen Energieverbräuche der elektrischen Geräte. Aus der Verbrauchssumme der einzelnen Geräte lässt sich die benötigte Anzahl an PV-Modulen von der Person am Handbuch ermitteln.

Level 2 hat kein Zeitlimit und hat den reinen Wissenstransfer bezüglich der benötigten technischen Hauptkomponenten einer Photovoltaikanlage und deren Erzeugungskapazitäten zum Ziel. Weiterhin bekommt der Nutzer, welcher vorher das Handbuch bedient hat, die Möglichkeit, die virtuelle Welt ebenfalls zu erkunden und elektrische Verbraucher ausfindig zu machen. Die Balance zwischen aktivem

Erleben der virtuellen Welt und dem Arbeiten mit dem Handbuch wird so für beide Spieler:innen gewährleistet. Analog zu Level 1 wird nach Beendigung des Levels ein Ergebnisbildschirm eingeblendet, welcher in Abbildung 7 dargestellt ist. Neben einer Liste mit den durchschnittlichen jährlichen Energieverbräuchen der einzelnen elektrischen Verbraucher wird prozentual die durch die PV-Anlage produzierte Strommenge, bezogen auf den durchschnittlichen jährlichen Stromverbrauch des Hauses, angezeigt.



Abbildung 5: Anbringung der PV-Module

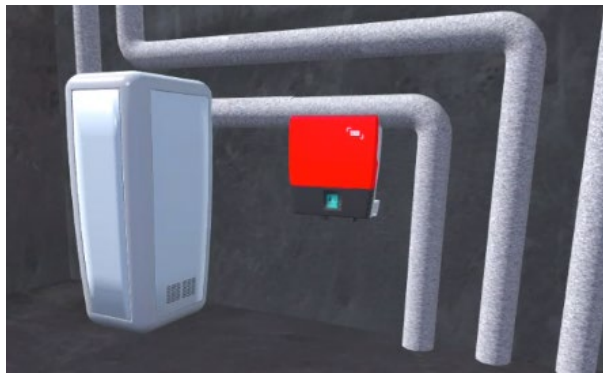


Abb. 6: Anbringung von Batteriespeicher & Wechselrichter



Abb. 7: Ergebnisdarstellung Level 2

Weiterhin wurden seitens des ZIES die begleitenden Lehr- und Lernmaterialien erstellt und parallel zur Softwareentwicklung durch regelmäßige Evaluation iterativ weiterentwickelt. Das Handbuch ist fester Bestandteil des Spieleablaufs der VR-Anwendung. Es beinhaltet neben einer Einleitung in das Thema und einer kurzen Anleitung zum Spielverlauf alle notwendigen Informationen, die der Person in der virtuellen Realität im Verlauf des Spiels mitgeteilt werden. Aus Gründen der Nachhaltigkeit wird das Handbuch in digitaler Form auf einem Tablet genutzt und liegt als PDF-Datei vor. Es wurde Wert auf eine für die Zielgruppe optisch ansprechende grafische Gestaltung gelegt. Das Handbuch hat den Charakter eines Nachschlagewerks mit Grundinformationen zu den fachlichen Inhalten der Anwendung und steht auf der Homepage der Schülerlabore zum Download bereit (<https://www.hs-duesseldorf.de/schuelerlabore/news>).

Um den Lernerfolg weiter zu steigern, führt vor der Durchführung der VR-Anwendung ein interaktives Unterrichtsgespräch anhand einiger vorbereiteter Folien in das Themenfeld ein. Auch werden nach einer kurzen allgemeinen Erklärung der virtuellen Realität und des Spielablaufs die zu erreichenden Ziele der Anwendung in den Gesamtkontext der Energiewende und des Klimawandels gesetzt, was die Dringlichkeit und Notwendigkeit der im Spiel illustrierten Handlungen nochmal verdeutlicht.

4. Fazit

Im Zuge des Projektes wurde eine effektive VR-Anwendung entwickelt, welche erfolgreich im Schülerlabor eingesetzt wird. In den Schülerlaborkursen zeigt sich, dass Virtuelle Realität ein besonders attraktiver Baustein ist, um junge Menschen in eine Auseinandersetzung zu den behandelten Themen zu bringen und schwierig zu erklärende Sachverhalte zu vermitteln.

Die Schüler:innen setzen sich mit dem Thema Energiesparen und Erneuerbare Energien im Haushalt auseinander. Sie betreten die virtuelle Realität und lernen verschiedene Möglichkeiten kennen, um den Energieverbrauch eines Einfamilienhauses zu senken und einen Teil des Stromes mit einer Photovoltaikanlage selbst zu produzieren. Auch die Trennung in zwei getrennt spielbare Levels, die Teamarbeit zweier Spieler:innen in der virtuellen Realität und am digitalen Handbuch sowie der Tausch

der beiden Spieler:innen nach dem ersten Level haben sich bewährt.

Die im Projektverlauf erstellten Lehr- und Lernmaterialien funktionieren in der Praxis gut. Ein didaktischer Rahmen bestehend aus einem kurzen interaktiven Unterrichtsgespräch zum Einstieg in das Thema in Verbindung mit einer offenen Diskussion im Anschluss an die Durchführung der VR-Anwendung reflektiert das Erlebte und vertieft die behandelten fachlichen Inhalte.

5. Literaturverzeichnis

- [1] Köhler, Thomas, Sander Münster, und Lars Schlenker. 2013. «Didaktik virtueller Realität: Ansätze für eine zielgruppengerechte Gestaltung im Kontext akademischer Bildung». In *Hochschuldidaktik im Zeichen von Heterogenität und Vielfalt: Doppelfestschrift für Peter Baumgartner und Rolf Schulmeister*, hrsg. v. Gabi Reinmann, Martin Ebner und Sandra Schön, 97-110. Norderstedt: Books on Demand. Abrufbar unter <https://www.bimsev.de/n/userfiles/downloads/%20festschrift.pdf>.

- [2] Freina, Laura, und Michela Ott. 2015. «A Literature Review on Immersive Virtual Reality in Education: State Of The Art and Perspectives». *eLearning & Software for Education* 1, 133-141.

- [3] Schwan, Stephan, und Jürgen Buder. 2006. *Virtuelle Realität und E-Learning*. Abrufbar unter <http://www.e-teaching.org/didaktik/gestaltung/vr/vr.pdf>.

CO₂-Calculator HSE

Rainer Stauch¹

¹ Institut für Angewandte Strömungssimulation (IAS), Hochschule Esslingen,
Kanalstraße 33, 73728 Esslingen

Abstract

Der CO₂-Calculator HSE ist ein CO₂-Rechner, der es Privatpersonen ermöglicht, ihren persönlichen CO₂-Fußabdruck zu berechnen. Der CO₂-Calculator HSE ist als Android-App in den Sprachen Deutsch und Englisch verfügbar. Eine reduzierte Version des CO₂-Calculator HSE ist als Excel-Datei verfügbar. Bei der Benutzung wird besonderer Wert auf eine detaillierte, quantifizierte Eingabe von Konsumdaten gelegt. Neben der Detaillierung und Quantifizierung liegt ein weiterer Fokus auf der Nachvollziehbarkeit der Berechnung der Resultate sowie der dazu verwendeten Datenquellen. Aus diesem Grund sind alle verwendeten Datenquellen für jeden Nutzer einsehbar. Die Konsumdaten werden in den Kategorien Haushalt, Mobilität, Ernährung, Textilien und Elektronik erhoben, deren Eingabewerte vorgestellt werden. Anhand von repräsentativen Beispielen wird die Berechnung der THG-Emissionen dargestellt. Die Ergebnisdarstellung des CO₂-Calculator HSE wird ebenfalls präsentiert.

Abschließend wird die Motivation der Entwicklung sowie die angestrebte Nutzung des CO₂-Rechners diskutiert. Die Auseinandersetzung mit der Thematik der Umweltbeeinflussung durch technische Prozesse und Produkte und deren Quantifizierung soll durch die Benutzung gefördert und ein Bewusstsein für die Bedeutung von Umwelteinflüssen als Konsequenz gesellschaftlicher und industrieller Prozesse geschaffen werden. Zudem werden Ansätze zur Weiterentwicklung dieses und anderer CO₂-Rechner präsentiert.

1. Einführung

Ein nicht zu vernachlässigender Aspekt im Rahmen des Übergangs unserer Energiebereitstellung hin zu erneuerbaren Energien ist das Bewusstsein innerhalb der Bevölkerung bzw. Gesellschaft für die Konsequenzen ihres Energieverbrauches.

Das Maß zur Quantifizierung des Umwelteinflusses auf die globale Erwärmung ist der Gesamtausstoß an Treibhausgasen (THG-Emission). Die Referenzgröße für THG-Emissionen ist der Ausstoß von Kohlendioxid (CO₂), weswegen die CO₂-Emission auch oft mit den THG-Emissionen gleichgesetzt wird.

Ein inzwischen verbreitetes Tool zur Feststellung des persönlichen CO₂-Ausstoßes, auch CO₂-Fußabdruck genannt, sind die CO₂-Fußabdruck-Rechner, kurz CO₂-Rechner. Der wohl bekannteste CO₂-Rechner in Deutschland ist der Rechner vom Umweltbundesamt [1] bzw. von KlimAktiv [2]. Des Weiteren sind auch die CO₂-Rechner des Bayerischen Landesamts für Umwelt (LFU) [3], von KlimaOhneGrenzen [4], GoClimate.de [5], WWF [6] und Naturefund e.V. [7] zu nennen. Darüber hinaus sind auch CO₂-Rechner als Android-Apps, wie OneClimate von wattx, 2zero – Der CO₂ Rechner von 2zero oder Carbon Footprint & CO₂ Tracker von The Capture Club verfügbar.

Der CO₂-Calculator HSE ist ein solcher CO₂-Rechner, der es Privatpersonen ermöglichen soll, ihren persönlichen CO₂-Fußabdruck zu berechnen. Dazu müssen vom Nutzer Angaben zum Nutzungsverhalten in den Kategorien Haushalt, Mobilität, Ernährung, Textilien und Elektronik gemacht werden. Ein Kritikpunkt an bestehenden CO₂-Rechnern ist die fehlende Transparenz. Bei vielen Rechnern können keine genauen Quellen eingesehen werden. Eine genaue Nachverfolgung von der Eingabe der eigenen Daten, über die Berechnung auf Grundlage verschiedener Quellen bis hin zur Auswertung und Vergleich ist somit nicht möglich. Ein weiterer Kritikpunkt an bestehenden CO₂-Rechnern ist der Umstand, dass Angaben zum Konsum und der Lebensweise oftmals sehr vage oder qualitativ und nicht mittels konkreten quantitativen Werten angegeben werden müssen. Eine Ausnahme

stellt hier der CO₂-Rechner des Umweltbundesamtes dar [1], da dieser in allen Kategorien auch eine detaillierte, quantitative Eingabe des Verbrauchs bzw. Konsums zulässt. Darüber hinaus sind bestehende CO₂-Rechner recht unflexibel. So können etwa die Angaben zum Strommix nicht individuell vom Nutzer eingestellt werden. Somit ist ein bestehender Rechner bestimmten Randbedingungen, wie z. B. einer geografischen Region zugeordnet.

Der CO₂-Rechner des Umweltbundesamtes ist somit den anderen CO₂-Rechnern in nahezu allen Belangen überlegen. Die Erhebung der Nutzerdaten findet über eine Internetseite statt. Die Nutzerdaten können mittels Identifikation über einen Bookmark gespeichert und erneut abgerufen werden. Der CO₂-Calculator HSE hingegen ist als Android-App in den Sprachen Deutsch und Englisch verfügbar. Eine reduzierte Version des CO₂-Calculator HSE ist als Excel-Datei verfügbar. Somit kann der CO₂-Fußabdruck auch offline berechnet und lokal gespeichert werden. Dies ermöglicht eine autarke Speicherung der eigenen Daten. Da der CO₂-Calculator HSE im Rahmen des Studienmoduls *Sustainable Energy Systems* eingesetzt wird, ermöglicht er interessierten Studierenden die aktive Mitarbeit an der Weiterentwicklung des Tools. Beim CO₂-Calculator HSE müssen alle Eingaben vom Nutzer detailliert quantifiziert werden. Aus jeder Eingabe lässt sich anschließend die entsprechende CO₂-Emission nachvollziehbar errechnen. Daher kann im Rückschluss aus dem Gesamtergebnis wieder genau nachvollzogen werden, welcher Bereich des eigenen Lebensstils welche Emissionen verursacht.

2. Hintergrund des CO₂-Rechners

Die Temperaturverteilung der Erde hängt maßgeblich von der energetischen Bilanz der Erde im Austausch mit ihrer Umgebung ab. Der Energieaustausch mit dem die Erde umgebenden Weltall basiert ausschließlich auf dem Energietransport durch Strahlung. Abb. 1 zeigt die Strahlungsbilanz der Erde.

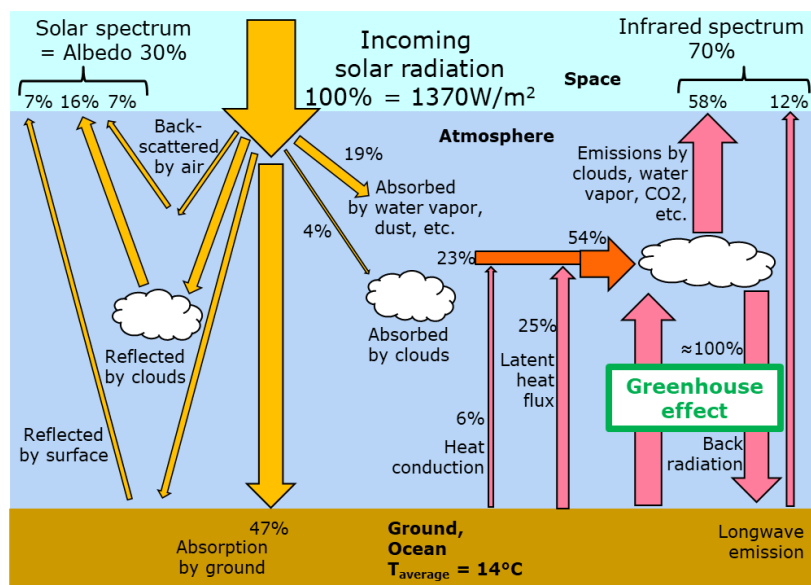


Abb. 1: Strahlungsbilanz der Erde

Die eintreffende Strahlung der Sonne wird zum Teil durch die Atmosphäre reflektiert (Albedo $\approx 30\%$). Der andere Teil der Sonnenstrahlung wird durch die Atmosphäre sowie die Erdoberfläche absorbiert. Die Erde emittiert hingegen Wärmestrahlung im langwelligeren Bereich. Ein Teil dieser Infrarotstrahlung wird durch die Erdatmosphäre reflektiert. Dieser Umstand wird als Treibhauseffekt bezeichnet. Verantwortlich dafür sind die Gase in der Erdatmosphäre, die die Infrarotstrahlung der Erde nicht transmittieren, sondern vielmehr absorbieren bzw. reflektieren und Treibhausgase genannt werden. Die beiden am häufigsten in der Atmosphäre vorkommenden Gase Stickstoff (N₂) und Sauerstoff (O₂) sind

keine Treibhausgase, da sie nicht mit der Infrarotstrahlung interagieren. Die bekanntesten und relevantesten Treibhausgase sind Kohlendioxid (CO₂), Wasserdampf (H₂O), Methan (CH₄), Lachgas (N₂O) sowie Ozon (O₃).

Durch den vermehrten anthropogenen Ausstoß von Treibhausgasen verstärkt sich somit der Treibhauseffekt der Erde. Der vermehrte Ausstoß eines Gases lässt sich an der Konzentration des Gases in der Atmosphäre feststellen. Da Kohlenstoffdioxid bei der Verbrennung aller Kohlenwasserstoffe sowie bei der Verbrennung von Kohle gebildet wird und die CO₂-Konzentration in der Atmosphäre sehr gut experimentell bestimmt werden kann, ist der Anstieg der CO₂-Konzentration in der Erdatmosphäre gut dokumentiert (siehe Abb. 2).

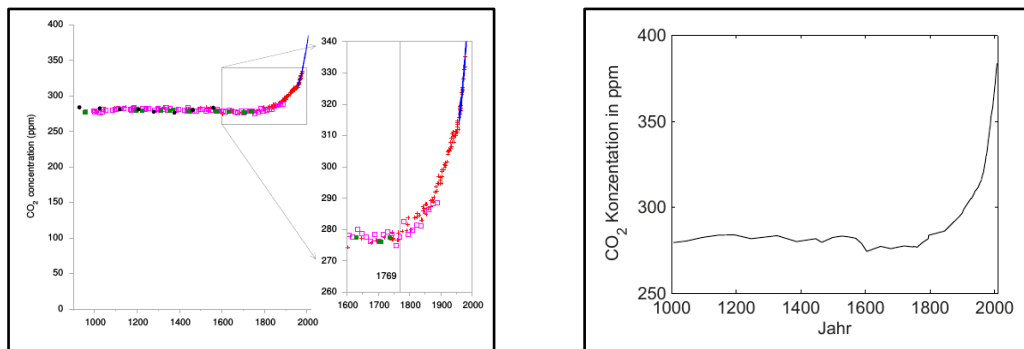


Abb. 2: Entwicklung der CO₂-Konzentration in der Erdatmosphäre (nach [8] bzw. [9])

Um den Einfluss der verschiedenen Treibhausgase auf den Treibhauseffekt der Erde quantifizieren zu können, also um Einflüsse verschiedener Gase vergleichen bzw. aufsummieren zu können, bedarf es zumindest einer Messgröße für die Emission von Treibhausgasen. Für die Aufsummierung der Emissionen verschiedener Gase benötigt man zudem die relativen Faktoren der Umwelteinflüsse der verschiedenen Gase hinsichtlich des Treibhauseffekts der Erde. Dieser relative Faktor wird Global Warming Potential, kurz GWP, genannt. Als Referenzsubstanz wurde Kohlendioxid, CO₂, festgelegt. Somit wird auch der Gesamtausstoß aller Treibhausgase (THG-Emissionen) in kg CO₂-eq. (oder auch t CO₂-eq.) bemessen. Die gesamte THG-Emissionen berechnen sich als Summe der einzelnen Treibhausgase, deren Summanden mit dem jeweiligen GWP gewichtet werden. Als veranschaulichendes Beispiel zeigt Gleichung (1) die Berechnung der THG-Emissionen von in die Atmosphäre entweichendem, unverbranntem Biogas.

$$m_{emit,THG-Emissionen} \text{ (in kg CO}_2\text{-eq.)} = 1 \cdot m_{emit,CO_2} + GWP_{CH_4} \cdot m_{emit,CH_4} + GWP_{H_2} \cdot m_{emit,H_2} \quad (1)$$

3. Kategorien des CO₂-Calculator HSE

Der CO₂-Calculator HSE ist ein CO₂-Rechner, der es Privatpersonen ermöglichen soll, Ihren persönlichen CO₂-Fußabdruck zu berechnen. Dazu müssen vom Nutzer Angaben zum Nutzungsverhalten in den Kategorien Haushalt, Mobilität, Ernährung, Textilien und Elektronik gemacht werden.

In der Kategorie Haushalt wird der Bedarf an Heizenergie sowie der Stromverbrauch abgefragt. Für die Erhebung der Heizenergie ist die Art der Heizung sowie der Verbrauch an zugeführtem Energieträger anzugeben. Neben Heizöl, Erdgas und Flüssiggas stehen auch Holz, Holzpellets, Steinkohle, Braunkohle sowie Fernwärme als wählbare Heizenergiequellen zur Verfügung. Der Energiebedarf von Wärmepumpen wird über die Erhebung des Stromverbrauches abgedeckt. Als Stromquellen sind der übliche (konventionelle) Strommix sowie Ökostrom wählbar, um den derzeitigen Möglichkeiten bei der Wahl des Stromtarifes zu entsprechen. Ergänzend muss noch die Anzahl der im Haushalt lebenden Personen angegeben werden, um den entsprechenden Anteil an THG-Emissionen zu berechnen (siehe Abb. 3 links).

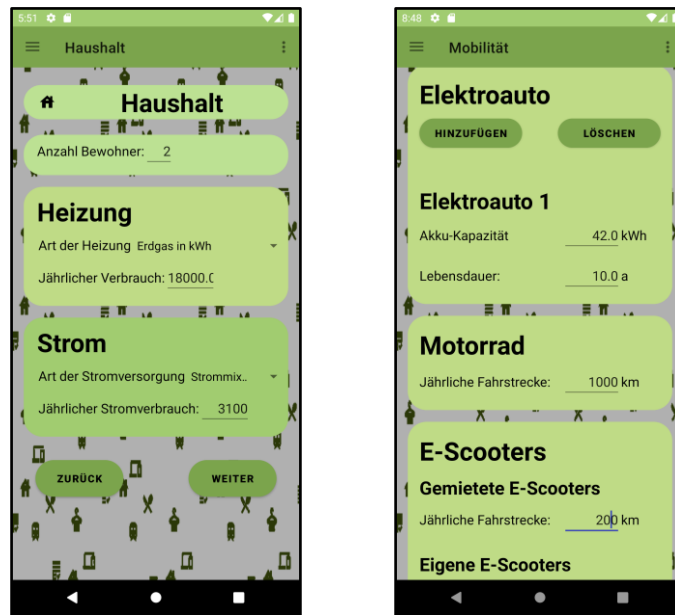


Abb. 3: Kategorie Haushalt (links) und Mobilität (rechts)

In der Kategorie Mobilität wird das Mobilitätsverhalten hinsichtlich gefahrener Kilometer mit (konventionellen) Fahrzeug(en) (mit Verbrennungsmotor), mit E-Autos, mit dem Motorrad, mit dem E-Scooter sowie gefahrener Bus- und Zugkilometer erfasst. Darüber hinaus werden die mit dem Flugzeug zurückgelegten Kilometer erfasst (siehe Abb. 3 rechts).

In der Kategorie Ernährung hat der Nutzer über die konsumierten Mengen an Milchprodukten (i.e. Milch, Joghurt, Käse) sowie seinen Fleisch- und Fischkonsum Auskunft zu geben. Um dem Ansatz einer detaillierten, quantitativen Erhebung der THG-Emissionen gerecht zu werden, wird dabei zwischen Rind-, Schweine- sowie Geflügelfleisch unterschieden. Außerdem ist der jeweilige Konsum in messbaren Größen in kg bzw. Liter Konsum pro Woche anzugeben (siehe Abb. 4 links).



Abb. 4: Kategorie Ernährung (links), Textilien (Mitte) und Elektronik (rechts)

Der Textilienkonsum wird in der Kategorie Textilien quantifiziert. Auch hier gilt es, quantitativ messbare

Größen für den Konsum zu erheben. Dazu muss der Textilienkonsum in kg pro Monat an verschiedenen Fasern angegeben werden. Zur Auswahl an Fasern stehen bislang Bio-Baumwolle, Baumwolle, Polyester sowie Acrylfasern. Zur Erleichterung der Angabe von konsumierten Fasern in kg pro Monat wird dem Nutzer eine Übersicht von typischen Gewichten pro Kleidungsstück gegeben (siehe Abb. 4 Mitte).

Die Benutzung elektronischer Geräte, wie Desktop-PCs, Laptops und Smartphones ist in der Kategorie Elektronik anzugeben. Für den CO₂-Fußabdruck ist bei Konsumgütern die Häufigkeit der Beschaffung bzw. der Herstellung und somit die Nutzungsdauer maßgeblich. Deshalb ist für die jeweiligen Geräte die Nutzungs- bzw. Lebensdauer anzugeben. Eine relevante Quelle für die Verursachung von THG-Emissionen ist der Konsum von Daten aus dem Internet, wie z. B. Video- oder Musikstreaming, der letztendlich zum Betrieb von Servern (und deren Herstellung) führt, was THG-Emissionen verursacht. Da Analysen zu den Umwelteinflüssen des Datenkonsums im Internet anhand der Datenmenge quantifiziert wird, ist in diesem Abschnitt die monatliche Datennutzung in GB anzugeben. Falls diese nicht bekannt ist, können alternativ dazu tägliche Nutzungszeiten angegeben werden (siehe Abb. 4 rechts).

4. Berechnung der CO₂-Emissionen

Eine vollumfängliche Darstellung der Berechnung aller erhobenen CO₂- bzw. THG-Emissionen ist aufgrund des Umfangs im Rahmen dieses Artikels nicht möglich. Es wird jedoch anhand ausgewählter Beispiele die Berechnung der THG-Emissionen aus den eingegebenen Nutzerdaten gezeigt. m_{CO_2} bezeichnet dabei jeweils die CO₂- bzw. THG-Emissionen in kg CO₂-eq.

Zur Berechnung der Emissionen, die durch einen bestimmten Brennstoff einer Heizung verursacht werden, wird der Emissionsfaktor des Brennstoffes $\epsilon_{Pellets}$ mit dem Heizwert des Brennstoffes $H_{Pellets}$ sowie mit der verbrauchten Masse des Brennstoffes $m_{Pellets}$ multipliziert (Die eingefügten Zahlenwerte aus [10] dienen lediglich als Beispielrechnung).

$$m_{CO_2, Pellets} = \epsilon_{Pellets} \cdot H_{Pellets} \cdot m_{Pellets} = 24 \frac{t_{CO_2\text{-eq.}}}{TJ} \cdot 18 \frac{MJ}{kg} \cdot 4 t = 1728 \text{ kg CO}_2\text{-eq.} \quad (2)$$

Für einen angegebenen Energieverbrauch, wie im Fall des verbrauchten Stroms, muss die verbrauchte Energie lediglich mit dem Emissionsfaktor, in diesem Fall des deutschen Strommixes $\epsilon_{Strommix-D}$ [11], multipliziert werden (Die eingefügten Zahlenwerte dienen lediglich als Beispielrechnung).

$$m_{CO_2, Strom} = \epsilon_{Strommix-D} \cdot E_{Strom} = 564 \frac{g_{CO_2\text{-eq.}}}{kWh} \cdot 1000 \text{ kWh} = 564 \text{ kg CO}_2\text{-eq.} \quad (3)$$

Für die Emissionen, die von einem Fahrzeug mit Verbrennungsmotor verursacht werden, wird der Emissionsfaktor des Treibstoffes ϵ_{Diesel} (nach [12]) mit dem verbrauchten Treibstoff pro gefahrener Strecke V_{Diesel} sowie der gefahrenen Strecke $d_{Fahrstrecke}$ multipliziert.

$$m_{CO_2, Diesel-PKW} = \epsilon_{Diesel} \cdot V_{Diesel} \cdot d_{Fahrstrecke} = 2.80 \frac{kg_{CO_2\text{-eq.}}}{l} \cdot 6 \frac{l}{100km} \cdot 5000 \text{ km} = 840 \text{ kg CO}_2\text{-eq.} \quad (4)$$

Für Verkehrsmittel, die sich nicht im Besitz des Nutzers befinden, ist meist ein Emissionsfaktor pro gefahrener Strecke $\epsilon_{E-Scooter}$ bekannt, der mit der gefahrenen Strecke $d_{E-Scooter}$ multipliziert wird. Das nachfolgende Beispiel für gemietete E-Scooter (Zahlenwert für $\epsilon_{E-Scooter}$ nach [13]) gilt analog für Flug-Bus- und Zugverkehr.

$$m_{E-Scooter} = \epsilon_{E-Scooter} \cdot d_{E-Scooter} = 0.131 \frac{kg_{CO_2\text{-eq.}}}{km} \cdot 200 \text{ km} = 26.2 \text{ kg CO}_2\text{-eq.} \quad (5)$$

Zur Ermittlung der THG-Emission durch Konsumgüter ist bei einer Vielzahl von Gütern, wie Nahrungsmitteln, Textilien, etc., die Multiplikation der konsumierten Menge mit dem entsprechenden Emissionsfaktor, der bekannt sein muss, ausreichend. Durch den Konsum von Rindfleisch verursachte Emissionen werden durch die Multiplikation des Emissionsfaktors von Rindfleisch $\epsilon_{Rindfleisch}$ (nach [14])

mit der konsumierten Masse $m_{Rindfleisch}$ errechnet.

$$m_{Rindfleisch} = \epsilon_{Rindfleisch} \cdot m_{Rindfleisch} = 13.80 \frac{\text{kg CO}_2\text{-eq.}}{\text{kg}} \cdot 20 \text{ kg} = 276 \text{ kg CO}_2\text{-eq.} \quad (6)$$

Wird ein Konsumgut über mehrere Jahre hinweg benutzt, müssen die Emissionen auf die jeweilige Anzahl der Jahre verteilt werden. Bei mehreren Konsumgütern der gleichen Art wird entsprechend mit deren Anzahl multipliziert. Das nachfolgende Beispiel zeigt die Berechnung der Emissionen, die durch Smartphones verursacht werden (Emissionsfaktor $\epsilon_{Smartphone}$ nach [15]).

$$m_{Smartphone} = \epsilon_{Smartphone} \cdot \frac{n_{Smartphone}}{t_{Smartphone}} = 45.0 \frac{\text{kg CO}_2\text{-eq.}}{1} \cdot \frac{1}{2a} = 22.5 \text{ kg CO}_2\text{-eq.} \quad (7)$$

Zur Ermittlung der Emissionen, die durch die Nutzung des Internets bzw. durch Streaming verursacht werden, ist die naheliegende und belastbarste Methode einen Emissionsfaktor (nach [15]) mit der Menge an gestreamten Daten zu multiplizieren.

$$m_{Streaming} = \epsilon_{Streaming} \cdot n_{Streaming} = 0.22 \frac{\text{kg CO}_2\text{-eq.}}{\text{GB}} \cdot 100 \text{ GB} = 22 \text{ kg CO}_2\text{-eq.} \quad (8)$$

Alle im CO₂-Calculator HSE verwendeten (hier erwähnten) Faktoren können im Bereich *Datenquellen* vom Nutzer eingesehen werden. Die Angaben aller Quellen für die verwendeten Faktoren können dem CO₂-Calculator HSE ebenfalls direkt entnommen werden.

Bei der Berechnung der gesamten THG-Emissionen des Nutzers muss und wird jeder Nutzer noch mit „seinem Anteil“ an den öffentlichen Emissionen beaufschlagt. Diese beliefen sich zum Zeitpunkt des letzten Datenabgleichs im September 2022 auf $0.84 \frac{\text{t CO}_2\text{-eq.}}{\text{capita}}$ (nach [1]).

5. Auswertung und Ergebnisdarstellung

Neben der simplen Ausgabe der jährlichen CO₂- bzw. THG-Emissionen werden dem Nutzer weitere Informationen zur Verfügung gestellt, um den eigenen persönlichen CO₂-Fußabdruck einordnen zu können. Ein wesentlicher Aspekt zur eingehenderen Analyse ist die Darstellung der Beiträge der einzelnen Kategorien zum Gesamtergebnis (siehe Abb. 5 links). Darüber hinaus werden die einzelnen Kategorien in ihre Einzelbeiträge aufgeschlüsselt (siehe Abb. 5 rechts). Diese Darstellung ist bei den meisten CO₂-Rechnern, wie z. B. dem CO₂-Rechner des Umweltbundesamts [1], üblich.

Zur weiterführenden Auseinandersetzung mit den eigenen THG-Emissionen werden ergänzend als Referenzwerte die durchschnittlichen CO₂-Emissionswerte von Deutschland, Europa, der USA sowie der Welt dargestellt. Zur weiteren Beurteilung der Größenordnung der THG-Emissionen wird zudem auch das weltweite *Sustainability Limit* von 2,5 t CO₂-eq. illustriert (siehe Abb. 5 Mitte).



Abb. 5: Ergebnisdarstellung des CO₂-Calculator HSE

Zur Initiierung einer Kommunikation über den eigenen CO₂-Fußabdruck können die Ergebnisse aus der Android-App als Image geteilt werden.

6. Fazit, Nutzung und Verfügbarkeit

Das ursprüngliche Kernmotiv zur Entwicklung und Herausgabe dieses CO₂-Rechners liegt zweifelsohne in der angestrebten Motivierung des Nutzers zur emotionsfreien, detaillierten und fundierten Auseinandersetzung mit der Thematik der THG-Emissionen. Als ursprüngliche Adressaten sind hierbei Studierende technischer Studiengänge zu nennen, da in diesen Studiengängen einer der (überfachlichen) Lehraufträge (zumindest in den Grundlagenfächern) die detaillierte, quantitative Auseinandersetzung mit der zu behandelten Thematik ist. Hierbei spielt der Aspekt der Zuverlässigkeit und daraus folgend der Belastbarkeit eingesetzter Daten eine wesentliche Rolle. Daraus folgt direkt der Umstand der voll umfänglichen Angabe der verwendeten Datenquellen.

Für Studierende stellt der CO₂-Calculator HSE (wie auch andere CO₂-Rechner) einen niederschweligen Einstieg in die Thematik der Umweltbeeinflussung durch technische Prozesse und Produkte und deren Quantifizierung dar. Dieser Einstieg kann und soll die Studierenden dazu motivieren, sich eingehender mit dieser Thematik auseinanderzusetzen. Somit wird der Weg zur Diskussion und Erörterung von weiteren Konzepten zur Beurteilung von Umwelteinflüssen, wie ODP, AP oder dem Overshoot Day, geebnet. Konzeptionell gleichen alle CO₂-Rechner der industriellen, technischen Analyse von THG-Emissionen. Hierbei sind die Methoden des Corporate Carbon Footprint (CCF), des Product Carbon Footprint (PCF) sowie der Ökobilanz (Life Cycle Assessment, LCA) zu nennen. Die genannte Thematik erscheint für Einsteiger im Vergleich zu anderen (Grundlagen-) Fächern der technischen Studiengänge sehr unübersichtlich. Wirkliche Standardwerke sind bei der Literaturrecherche noch nicht zu finden. Somit steht der Einsteiger einer Vielzahl unterschiedlicher Informationen gegenüber, die es zunächst zu sortieren und in Beziehung zu setzen gilt. Die Erstellung des eigenen CO₂-Fußabdrucks soll dabei den Einstieg erleichtern. Zudem wird die detaillierte Quantifizierung (der Umwelteinflüsse) in den Vordergrund gestellt, wie es für eine grundlegende technische Analyse üblich ist. Auch die Hinterfragung der Zuverlässigkeit der Daten wird von Beginn an gefördert, was aufgrund der Schwierigkeit der Erhebung dieser Daten bei dieser Thematik essentiell ist. Darüber hinaus schafft die Erhebung des eigenen CO₂-Fußabdrucks ein Bewusstsein für die Bedeutung von Umwelteinflüssen als Konsequenz gesellschaftlicher und industrieller Prozesse.

Für interessierte Studierende bietet sich auch die Möglichkeit, an der Weiterentwicklung des CO₂-Calculator HSE im Rahmen ihres Studiums mitzuwirken. Die vorhandenen Softwareplattformen Android-App und Excel bieten dabei ein für Studierende motivierendes Umfeld, sich ebenfalls die softwaretechnischen notwendigen Kenntnisse zur Weiterentwicklung anzueignen.

Neben der erwähnten Studierenden sind Schüler höherer Klassen ebenfalls sehr gut als Adressat für diesen (oder andere) CO₂-Rechner geeignet, da die Erstellung des eigenen CO₂-Fußabdrucks auch für Schüler eine geringe Schwelle zum Einstieg in die Thematik Treibhauseffekt, Umwelteinflüsse und THG-Emissionen bietet. Vielmehr treten bei der Erstellung des CO₂-Fußabdrucks neue Fragen auf, die zur weiteren Auseinandersetzung mit der Thematik motivieren.

Um eine Vielzahl potentieller Nutzer anzusprechen, muss die Hürde zum Einstieg in die Erstellung eines CO₂-Fußabdrucks so niedrig wie möglich und so motivierend wie möglich gestaltet werden. Die bisherige nicht vorhandene Verfügbarkeit eines CO₂-Rechners als Smartphone-App, die detailliert die Nutzerdaten erfasst, keine Account-Erstellung benötigt und die eingegebenen Daten ausschließlich lokal auf dem Smartphone speichert, war ebenfalls ein Kernmotiv zur Entwicklung des CO₂-Calculator HSE. Der Schutz der eigenen Daten ist somit automatisch gewährleistet. Dies gilt in gleicher Weise für die Benutzung der reduzierten Version als Excel-Datei.

Der CO₂-Calculator HSE soll auch außerhalb der Hochschule Esslingen verfügbar sein und kann deshalb unter der in gezeigten Internetadresse heruntergeladen werden.



Abb. 6: QR-Code der Internetadresse (<https://sites.google.com/view/co2-calculator-hse/main>) zum Download des CO₂-Calculators HSE

7. Ausblick

Als Hauptziele für die Weiterentwicklung des CO₂-Calculators HSE sind die weitere Detaillierung der Datenbasis und somit des einzugebenden Konsumverhaltens sowie die Erweiterung des Tools hinsichtlich Nutzbarkeit sowie ausgegebener Informationen zu nennen.

Weitere sinnvolle Eingabedaten, die in Zukunft hinzugefügt werden, könnten Schiffsreisen (i.e. Fährfahrten, Kreuzfahrten), Elektromotor-Roller sowie die Haltung von Haustieren sein. Eine weitere Detaillierung der Antriebsarten von Fahrzeugen auf Hybridantrieb sowie E10- oder E85-Kraftstoffe ist ebenfalls denkbar. Für eine Internationalisierung des CO₂-Calculators HSE wäre eine Wahlmöglichkeit der Heimatregion bzw. des Heimatlandes wünschenswert, die es ermöglicht, länderbezogene Daten, wie den Emissionsfaktor des Strommixes oder Referenzwerte für öffentliche Emissionen, zu berücksichtigen. Einige der hier erwähnten Erweiterungen sind in den CO₂-Rechnern des Umweltbundesamts [1] bzw. von KlimAktiv [2] bereits vorhanden.

Hinsichtlich der Erweiterung der Nutzbarkeit ist eine Umsetzung der App für iPhones auf Basis von iOS zu erwähnen. Eine Erweiterung des Umfangs der wählbaren Sprachen über Deutsch und Englisch hinaus ist ebenfalls wünschenswert. Ein direkteres Feedback, wieviel THG-Emissionen die einzelnen eingegebenen Daten verursachen, wie es beim CO₂-Rechner des Umweltbundesamts [1] realisiert ist, soll ebenfalls umgesetzt werden. Erläuterungen zu den einzelnen Kategorien und deren Bedeutung sollen ebenfalls integriert werden.

8. Literaturverzeichnis

- [1] Umweltbundesamt. CO₂-Rechner des Umweltbundesamtes, Release 4.2. 2024.
URL: https://uba.co2-rechner.de/de_DE/
- [2] KlimAktiv gGmbH. CO₂-Rechner. 2024. URL: <https://www.klimaktiv.de>
- [3] Bayrisches Landesamt für Umwelt (LFU). CO₂-Rechner. 2024. URL: https://lfu.co2-rechner.de/de_DE
- [4] Klima Ohne Grenzen. CO₂-Fußabdruck berechnen & ausgleichen. 2024.
URL: <https://klimaohnegrenzen.de/oekologischer-co2-fussabdruck>
- [5] GoClimate.de. GoClimate CO₂ Rechner. 2024. URL: <https://www.goclimade.de/co2-rechner/>
- [6] WWF. WWF-Klimarechner. 2024. URL: <https://www.wwf.de/themen-projekte/klimaschutz/wwf-klimarechner>
- [7] Naturefund e.V. 2024.CO₂-Rechner. URL: https://www.naturefund.de/wissen/co2_rechner
- [8] D.J.C. MacKay. Sustainable Energy – without the hot air. UIT Cambridge. 2009.
- [9] V. Wesselak, T. Schabbach, T. Link, J. Fischer. Handbuch Regenerative Energietechnik. 3. Auflage. Springer Vieweg. 2017.
- [10] U. R. Fritsche, L. Rausch. GEMIS-Emissionsfaktoren für Treibhausgase und KWK-Zurechnung. Öko-Institut e.V. 2010.
URL: https://iinas.org/tl_files/iinas/downloads/GEMIS/2010_GEMIS_EF_KWK-LHM.pdf
- [11] P. Icha, G. Kuhs. Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990 – 2016. Umweltbundesamt. 2017.
URL: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2017-05-22_climate-change_15-2017_strommix.pdf
- [12] K. Juhlich. CO₂-Emissionsfaktoren für fossile Brennstoffe. Umweltbundesamt. 2016.
URL: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1968/publikationen/co2-emissionsfaktoren_fur_fossile_brennstoffe_korrektur.pdf
- [13] H. Moreau, L. de Jamblinne de Meux, V. Zeller, P. D'Ans, C. Ruwet, W.M.J. Achten. Dockless e-scooter: A green solution for mobility? Comparative case study between dockless e-scooters, displaced transport, and personal e-scooters. Sustainability 12 p. 1803. 2020.
- [14] Stadt Heidelberg. CO₂-Spiegel. 2010. URL: http://www.co2spiegel.de/heidelberg/co2_spiegel.pdf
- [15] J. Malmudin, D. Lundén. The energy and carbon footprint of the global ICT and E&M sectors 2010—2015. Sustainability 10 p. 3027. 2018.

Verbesserte Clear-Sky-Erkennung durch hybrides Maschinelles Lernen

**Maximilian Schönau^{1,2}, Darwin Daume², Markus Panhuysen¹,
Achim Schulze³, Bernd Hüttl², Dieter Landes²**

¹ Smartblue AG, Kistlerhofstr. 75, 81379 München

² Hochschule für angewandte Wissenschaften Coburg, Fakultät für Elektrotechnik
und Informatik, Friedrich-Streib-Str. 2, 96450 Coburg

³ Technische Hochschule Rosenheim, Fakultät für Angewandte Natur-
und Geisteswissenschaften, Hochschulstr. 1, 83024 Rosenheim
Maximilian.Schoenau@smartblue.de, Darwin.Daume@hs-coburg.de

Abstract: Die präzise Erkennung von Clear-Sky-Momenten ist für die Überwachung und Effizienzanalyse von Photovoltaikanlagen von zentraler Bedeutung, da zu diesen Zeitpunkten definierte und modellierbare Einstrahlungsverhältnisse herrschen. Es wird ein hybrides Modell zur verbesserten Erkennung von Clear-Sky-Momenten auf Basis von Einstrahlungsdaten vorgestellt. Hierfür wurden zunächst manuell, dann mithilfe eines CNNs Merkmale aus den Einstrahlungsdaten gebildet. Eine Fallstudie mit Referenzdaten belegt, dass durch die Kombination dieser wissens- und datengetriebenen Methoden Clear-Sky-Momente zuverlässiger identifiziert werden können. Dadurch können Analysemethoden schneller und zuverlässiger Aussagen über die untersuchten PV-Anlagen treffen.

1. Einleitung

Clear-Sky-Bedingungen sind im Allgemeinen als Zeitpunkte definiert, zu denen der Himmel frei von Bewölkung ist. In der Photovoltaik wird die Definition präziser gefasst: Es handelt sich um Ereignisse, bei denen die direkte und diffuse Bestrahlung gemäß Clear-Sky-Bedingungen physikalisch modelliert werden kann, ohne durch Wolkenbildung gestört zu sein. Zur Beschreibung dieser Verhältnisse wurde die Bezeichnung Clear-Sky-Äquivalent eingeführt [1]. Diese Definition schließt auch Phasen mit ein, bei denen sich keine Wolken im direkten Weg zwischen der Sonne und dem Standort der PV-Anlage befinden, aber durchaus am Himmel vorhanden sind.

Für die Überwachung von PV-Anlagen ist die Clear-Sky-Erkennung von besonderer Bedeutung. Während Clear-Sky-Momenten ist die Evaluierung des Leistungsverhaltens von PV-Anlagen unter bestmöglich kontrollierten Bedingungen der Bestrahlungsstärke durchführbar. Durch direkten Vergleich der gemessenen elektrischen Leistung mit der auf Basis eines physikalischen Clear-Sky-Modells [2] vorhergesagten Leistung kann festgestellt werden, ob die Anlage gemäß der Erwartungen arbeitet. Auch für Strom-Spannungs-Analysen im Feld sind stationäre Testbedingungen erforderlich, die vorzugsweise bei klarem Himmel oder nur geringer Bewölkung stattfinden sollten. Diese Bedingungen gewährleisten, dass die erfassten Daten die realen Leistungsparameter der PV-Anlagen unter idealen Umständen widerspiegeln [3].

2. Erkennung von Clear-Sky anhand von Einstrahlungsdaten

Wie von Veihelmann et al. [4] beschrieben, wurden bereits zahlreiche Methoden zur Clear-Sky-Erkennung auf Basis unterschiedlicher Daten und Herangehensweisen vorgestellt [5]–[7]. Oft werden sowohl mit physikalischen, als auch datengetriebenen Ansätzen Kriterien ermittelt, mit welchen sich Clear-Sky-Momente anhand der Einstrahlungsdaten erkennen lassen. Ein gut geeigneter Indikator zur Clear-Sky-Erkennung ist der Messwert „Global Horizontal Irradiance“ (GHI), welcher in der Praxis mithilfe von Sensoren bei den PV-Anlagen oder mit Satellitendaten bestimmt wird.

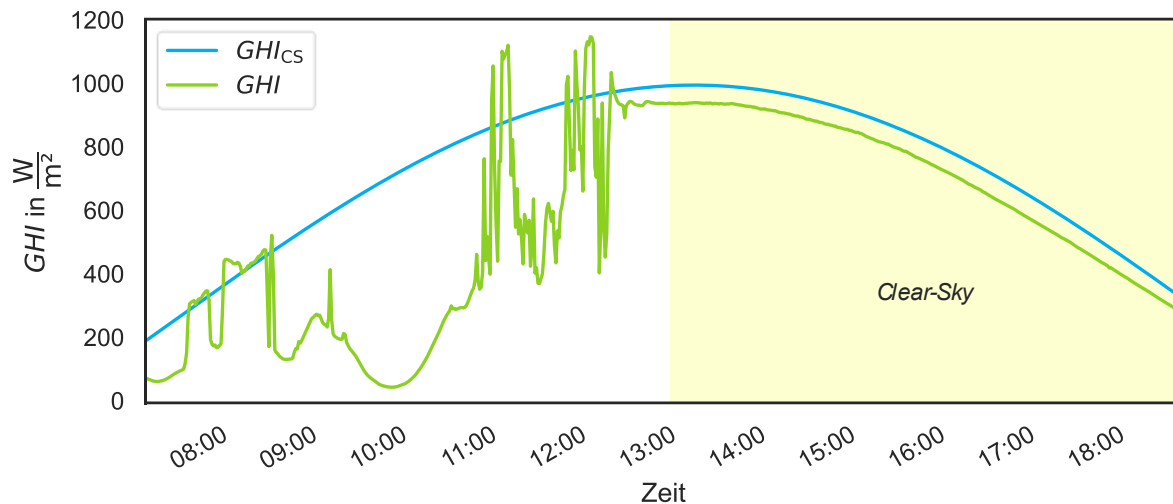


Abb. 1 Beispielhafter Einstrahlungs-Tagesverlauf des 03.07.2015 aus dem Datensatz von Veihelmann et al. [4] bestehend aus Clear-Sky-GHI-Schätzung nach Haurwitz [8] und GHI aus dem Folsom Einstrahlungs-Datensatz [9]

Abb. 1 zeigt einen experimentell ermittelten Tagesverlauf der GHI und den Parameter Clear-Sky-GHI (GHI_{CS}), welcher einer physikalischen Approximation der GHI nach einem Clear-Sky-Modell [10] entspricht.

Die stark schwankenden und von der Clear-Sky-GHI abweichenden Einstrahlungswerte machen visuell ersichtlich, dass die erste Tageshälfte durch Bewölkung geprägt war. In der zweiten Tageshälfte stimmten beide Werte weitgehend überein, es ist daher von Clear-Sky-Verhältnissen auszugehen. Diese Daten wurden von Veihelmann et al. [4] zum Labeln des Merkmals „Clear-Sky-Moment“ genutzt.

Für die manuelle wie auch automatisierte Klassifizierung eines Messpunktes als Clear-Sky-Ereignis können die Differenz zwischen GHI und Clear-Sky-GHI sowie zeitliche Muster in dieser Differenz bzw. in der Einstrahlung verwendet werden: Wechselhafte Einstrahlungswerte deuten auf einen bewölkten Himmel hin, auch wenn die Einstrahlungswerte eine nur geringe Differenz zum Parameter Clear-Sky-GHI vorweisen. Ebenso ist von einem bewölkten Himmel auszugehen, wenn die Einstrahlung einen zwar gleichmäßigen zeitlichen Verlauf, jedoch eine große Differenz zum Clear-Sky-GHI-Wert besitzt. Es wird untersucht, inwieweit sich diese Nuancen mithilfe einer Auswahl von Verfahren des Maschinellen Lernens unterscheiden lassen.

3. Verbesserte Clear-Sky-Erkennung

Als Ausgangssituation der Clear-Sky-Erkennung diente das Verfahren und die Daten von Veihelmann et al. [4]. Auf Basis dieses Ansatzes werden erweiterte Modelle des Maschinellen Lernens in Kombination mit einer optimierten Merkmalselektion und Hyperparameteranpassung untersucht.

Es wurden zwei Paradigmen verfolgt und evaluiert: Zum einen eine wissensgetriebene und zum anderen eine datengetriebene Optimierung des Clear-Sky-Klassifikators. Der wissensgetriebene Ansatz verbessert die Klassifikation vor allem durch gezielte Merkmalselektion auf Basis physikalischer Überlegungen hinsichtlich der Erkennung von Mustern aus den Einstrahlungsdaten. Im datengetriebenen Ansatz wird eine Genauigkeits-Verbesserung vor allem durch leistungsstarke Modelle und Modelloptimierungen erreicht. Diese weit gefassten Modelle ermöglichten in Verbindung mit hohen Rechen-Ressourcen [10], [11] eine automatische Generierung eines Klassifikators anhand der verfügbaren Daten mit einem geringem menschlichen Arbeitsaufwand.

3.1 Wissensgetriebene Klassifikation

Für die wissensgetriebene Clear-Sky-Erkennung wurden Eingabemerkmale aufbauend auf Veihelmann et al. [4] sowie entsprechend der Überlegungen aus Kapitel 2 gebildet: Da das manuelle Labelling der Daten auf Basis von Unregelmäßigkeiten und des Abstands von GHI und Clear-Sky-GHI durchgeführt wurde, wurde für die Klassifikation dieser Unterschied sowie verschiedene Merkmale zur automatischen Erkennung von diesen Mustern gebildet.

Diese wurden mithilfe von gängigen binären Klassifikatoren trainiert und ausgewertet. Für diese empirische Modellauswahl wurde unter anderem die Vorhersage-Genauigkeit von Support Vector Klassifikatoren [12], Bagging Klassifikatoren [13], Random Forest [14], Ada-Boost [15], Gradient Boosting [16] und eXtreme Gradient Boosting (XGBoost) [17] evaluiert. XGBoost ermöglichte dank seiner hohen Robustheit und Leistungsfähigkeit mit dem großen Datensatz die besten Ergebnisse.

Die Modellauswahl wurde bei verkleinerter Hyperparameter- und Merkmaloptimierung durchgeführt, um anschließend mithilfe der vollständigen Datenmenge eine tiefere Anpassung und Feinabstimmung des XGBoost-Modells und der Merkmalauswahl zu ermöglichen.

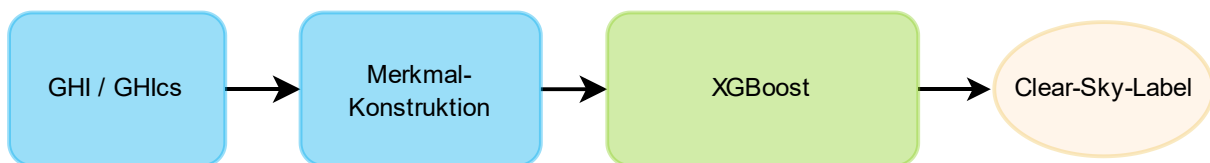


Abb. 2 Schematische Darstellung des wissensgetriebenen Modells

Abb. 2 stellt schematisch das wissensgetriebene Modell dar. Die Merkmalauswahl resultierte in den Quotienten aus GHI und Clear-Sky-GHI

$$\Delta GHI = \frac{GHI}{GHI_{CS}}, \quad (1)$$

ein gleitender Mittelwert der Ableitung von GHI, eine diskrete Fourier-Transformation über der GHI, sowie zwei Pearson-Korrelationen r_{GHI} [18], welche jeweils für ein langes und ein kurzes Zeitintervall gebildet wurden:

$$r_{GHI} = \frac{\sum_i (GHI_i - \overline{GHI}_i)(GHI_{CS,i} - \overline{GHI}_{CS,i})}{\sqrt{\sum_i (GHI_i - \overline{GHI}_i)^2 \cdot \sum_i (GHI_{CS,i} - \overline{GHI}_{CS,i})^2}} \quad (2)$$

Mit:

$$\overline{GHI}_i = \frac{1}{n} \cdot \sum_i^n GHI_i \quad (3)$$

Die Hyperparameter des XGBoost-Modells wie auch der Merkmale wurden mit Grid Search und Bayesischer Optimierung angepasst. Klassifikationen ohne vorherige wissensgetriebene Merkmalauswahl resultierten mit dem hierfür nicht gut geeigneten XGBoost-Modell mit einer Accuracy der binären Klassifikation von lediglich 80 % in keinen guten Ergebnissen.

3.2 Datengetriebene Klassifikation

Im datengetriebenen Ansatz wurde versucht, die Merkmalsextraktion direkt aus den Daten abzuleiten und nicht auf traditionelle, physikalische Ansätze wie die Pearson-Korrelationen oder Fourier-Transformation zu stützen. Da sich vor allem zeitliche Muster in den Einstrahlungsdaten für eine Clear-Sky-Erkennung eignen, wurden zur Erkennung dieser Muster Convolutional Neural Networks (CNNs) optimiert und trainiert.

Bei CNNs wird die effektive Merkmalauswahl im Zeitbereich ermöglicht, indem Filter für verschiedene Zeitskalen optimiert werden, welche mit dem Eingangssignal gefaltet werden [19]. Dadurch erlernt das Neuronale Netz beim Trainieren zwangsweise zeitliche Merkmale zur Klassifikation der Daten. Diese von den CNNs im Zeitbereich durchgeführten Faltungen können Eingabemerkmale generieren, die denen des wissensgetriebenen Ansatzes ähneln oder sie in Form und Effektivität noch übertreffen. Zwar war hierfür eine intensivere Nutzung von Rechenkapazitäten erforderlich, dafür konnte der menschliche Arbeitsaufwand in der Entwicklungsphase deutlich reduziert werden, welcher im wissensgetriebenen Ansatz für die Selektion und Bewertung der untersuchten Merkmale benötigt wurde.

Als Eingangssignal der verwendeten CNN-Architekturen diente GHI sowie die relative Abweichung zwischen GHI und Clear-Sky-GHI. Eine Verwendung von Clear-Sky-GHI direkt anstelle der Differenz des Parameters zu GHI erschien weniger vielversprechend, da der homogene Clear-Sky-GHI-Verlauf als solcher keine relevanten zeitliche Merkmale für die Merkmalsextraktion mit Filtern aufwies.

Die Parameter bzw. Hyperparameter der CNNs wurden mit Grid Search und Bayesischer Optimierung angepasst. Die binäre Klassifikation wurde innerhalb des CNN mithilfe eines vollvernetzten Neuronalen Netzes durchgeführt. Damit konnte lediglich eine ziemlich niedrige Accuracy von 88 % erreicht werden, und das reine CNN wurde nicht weiter verwendet.

Da das CNN während des Trainingsprozesses jedoch erlernte, neuartige relevante Muster aus den Eingangsdaten zu extrahieren, wurden diese Features mit dem XGBoost-Modell ausgewertet. Hierfür wurden die Filter der CNN als Vorverarbeitungsschritt der Daten anstatt der wissensgetriebenen Merkmalauswahl für das XGBoost-Modell eingesetzt.

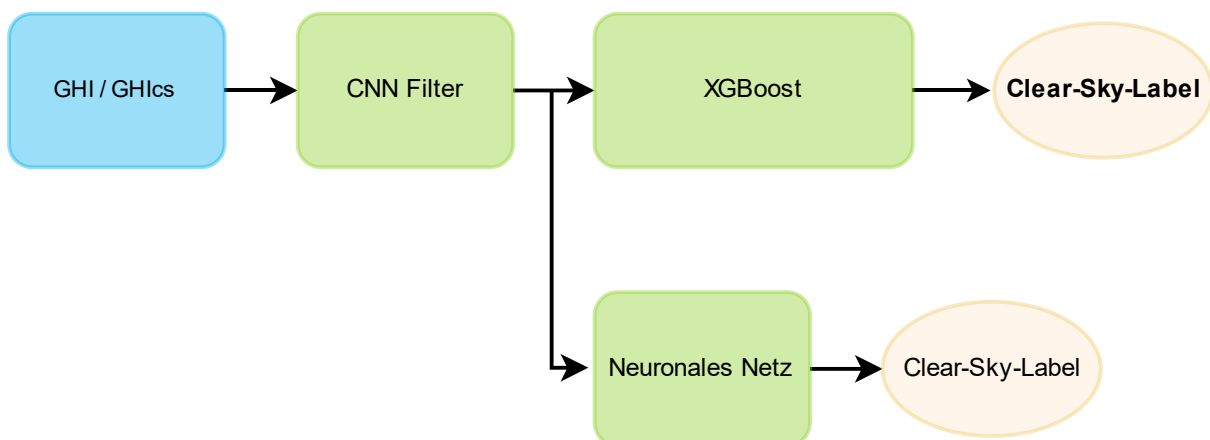


Abb. 3 Schematische Darstellung des datengetriebenen Verbund-Modells

Abb. 3 stellt schematisch das datengetriebene Modell dar. Diese Form eines Verbund-Modells aus einem CNN und dem XGBoost-Verfahren konnte bereits unabhängig von unseren Arbeiten erfolgreich in der Bioinformatik eingesetzt werden [20].

3.3 Hybrides Modell mit wissens- und datengetriebenen Merkmalen

Die beste Klassifizierung von Clear-Sky-Momenten ergab sich durch die Kombination des wissens- und datengetriebenen Modells.

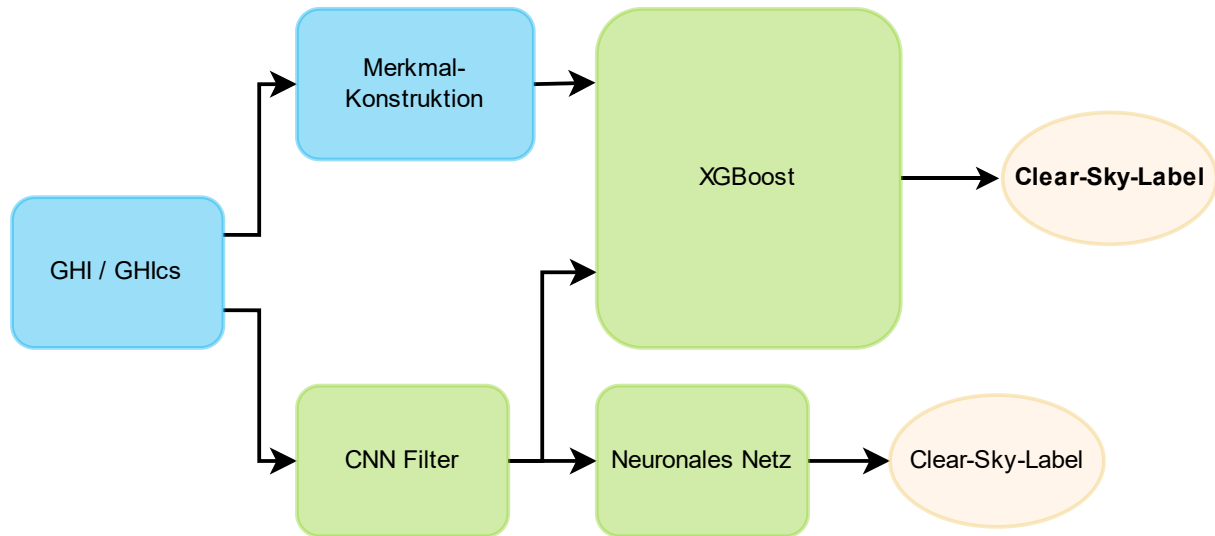


Abb. 4 Schematische Darstellung des hybriden Verbund-Modells

Abb. 4 zeigt eine schematische Darstellung des hybriden Klassifikators, bei welchem der XGBoost-Klassifikator mit den Merkmalen beider Methoden trainiert wurde.

4. Ergebnisse

Veihelmann et al. [4] verwendeten in ihrem Verfahren eine Clear-Sky-GHI Schätzung nach Haurwitz [8] und GHI aus dem Folsom Einstrahlungs-Datensatz [9], bei welchem manuell Clear-Sky-Momente gelabelt wurden. Zur vergleichenden Evaluierung der Modelle wurde derselbe gelabelte Datensatz verwendet, und analog zu Veihelmann et al. [4] das Jahr 2014 als Trainings- und Validierungsdatensatz und die Jahre 2015 und 2016 als Testdatensatz verwendet.

Für ein Trainieren und die Anwendung der Klassifikatoren in Deutschland ist womöglich eine erneute Hyperparameteranpassung sinnvoll, da die Einstrahlung sich in Deutschland mit seinem ozeanischem Klima und warmen Sommer gegenüber Folsom mit den dort vorherrschenden Mittelmeerklima mit heißen Sommern unterscheidet [21].

Tabelle 1 Vergleich der Leistungsfähigkeit der Modelle

	Accuracy	Precision	Recall	F1 Score
Veihelmann et al. [4]	91,2	85,1	95,6	90,1
Wissensgetriebenes Modell	92,7	88,0	93,5	90,7
Datengetriebenes Modell	91,1	86,4	94,2	90,1
Hybrides Modell	93,0	88,4	94,1	91,1

Tabelle 1 stellt die Bewertungsmaße der Modelle dar. Das wissensgetriebene Modell konnte gegenüber Veihelmann et al. [4] durch die erweiterte Hyperparameteranpassung und die in Kapitel 3 beschriebenen physikalischen Merkmale verbessert werden. Auch das datengetriebene Modell eignete sich gut für die

Clear-Sky-Erkennung, allerdings nicht besser als das wissensgetriebene Modell. Die Klassifikation konnte weiter optimiert werden, indem beide Ansätze zu einem hybriden Modell zusammengefasst wurden.

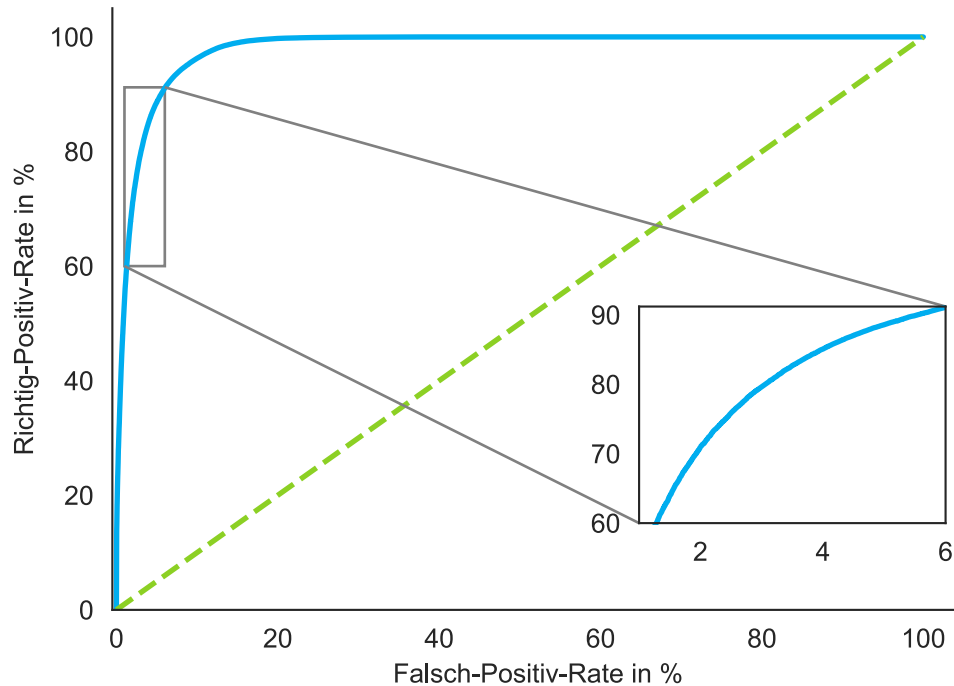


Abb. 5 ROC-Kurve des hybriden Klassifikators

Abb. 5 stellt die ROC-Kurve des hybriden Klassifikators dar. Eine ROC-Kurve bewertet die Leistung eines Klassifikators, indem sie das Verhältnis von Richtig-Positiv-Rate zur Falsch-Positiv-Rate bei unterschiedlichen Schwellwerten darstellt. Der Schwellwert ist der Wert, ab dem die vorhergesagte Wahrscheinlichkeit des hybriden Klassifikators als Zugehörigkeit zu einer bestimmten Klasse interpretiert wird. Dadurch kann die optimale Balance zwischen Sensitivität und Spezifität für unterschiedliche Anwendungsszenarien ermittelt werden. Die Fläche unter der AOC Kurve (ROC-AUC) beträgt 98 %.

Steht es wie im Kontext der Methoden von Smartblue bei der Verwendung des Clear-Sky-Klassifikators im Vordergrund, möglichst wenige fehlerhafte Clear-Sky-Momente zu klassifizieren, so ist es akzeptabel, die Accuracy des Modells zugunsten einer niedrigen Falsch-Positiv-Rate zu verschlechtern. So kann die Falsch-Positiv-Rate beispielsweise von 6 % auf 1,3 % verringert werden, wenn eine Verringerung der Richtig-Positiv-Rate von 90 % auf 60 % im Kontext der verwendeten Analysemethodik toleriert wird.

5. Fazit

Mithilfe von fortschrittlichen und an die Daten anpassungsfähigen Methoden des Maschinellen Lernens konnte eine zuverlässige Methode für die Klassifikation von Clear-Sky-Momenten entwickelt werden.

Die Ergebnisse des datengetriebenen Ansatzes mithilfe eines CNN zeigen, dass für die Clear-Sky-Erkennung keine aufwändige Merkmalsberechnung und -auswahl notwendig ist. Stattdessen können mit einem flexiblen Klassifikations-Modell fast ohne physikalisches Hintergrundwissen sehr gute Ergebnisse erzielt werden. Etwas bessere Klassifikationen ergaben sich durch eine aufwändigere Evaluierung von Merkmalen mithilfe von physikalischen Überlegungen. Die beste Klassifikation wurde durch einen hybriden Ansatz aus wissens- und datengetriebenem Maschinellen Lernen erreicht.

Das entwickelte hybride Modell erkennt praxistauglich und mit einer niedrigen Falsch-Positiv-Rate Clear-Sky-Momente. Diese Methode ermöglicht es, bei den Analysemethoden von Smartblue effektiv Zeitintervalle zu identifizieren, welche aussagekräftige Überwachungswerte der PV-Anlagen liefern. Dadurch kann die Genauigkeit und Geschwindigkeit in der Online-Überwachung der PV verbessert werden.

Danksagung

Die Autoren bedanken sich bei der Bayerischen Forschungsstiftung für die finanzielle Förderung des Projekts Kick-PV: KI-basierte Charakterisierung und Klassifizierung von PV-Anlagen zur prädiktiven Wartung unter dem Aktenzeichen AZ-1564-22.

Literaturverzeichnis

- [1] *Spatial distribution of daylight: luminance distributions of various reference skies*. in Technical report / International Commission on Illumination, no. 110. Vienna: CIE Central Bureau, 1994.
- [2] F. Antonanzas-Torres, R. Urraca, J. Polo, O. Perpiñán-Lamigueiro, und R. Escobar, „Clear sky solar irradiance models: A review of seventy models“, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Bd. 107, S. 374–387, Juni 2019, doi: 10.1016/j.rser.2019.02.032.
- [3] M. Scheler u. a., „Precise On-Site Power Analysis of Photovoltaic Arrays by Self-Reference Algorithm“, *8th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion; 1070-1073*, S. 4 pages, 28190 kb, 2022, doi: 10.4229/WCPEC-82022-4DO.1.4.
- [4] C. T. Veihelmann, M. Seifaei, M. Lübke, und N. Franchi, „Leveraging gradient-boosted trees to combine FFT-, correlation- and Fréchet-distance features for clear-sky detection“, in *40th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (forthcoming)*, Sep. 2023.
- [5] B. H. Ellis, M. Deceglie, und A. Jain, „Automatic Detection of Clear-sky Periods Using Ground and Satellite Based Solar Resource Data“, in *2018 IEEE 7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC) (A Joint Conference of 45th IEEE PVSC, 28th PVSEC & 34th EU PVSEC)*, Waikoloa Village, HI: IEEE, Juni 2018, S. 2293–2298. doi: 10.1109/PVSC.2018.8547877.
- [6] M. Alia-Martinez, J. Antonanzas, R. Urraca, F. J. Martinez-de-Pison, und F. Antonanzas-Torres, „Benchmark of algorithms for solar clear-sky detection“, *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, Bd. 8, Nr. 3, S. 033703, Mai 2016, doi: 10.1063/1.4950948.
- [7] M. J. Reno und C. W. Hansen, „Identification of periods of clear sky irradiance in time series of GHI measurements“, *Renewable Energy*, Bd. 90, S. 520–531, Mai 2016, doi: 10.1016/j.renene.2015.12.031.
- [8] B. Haurwitz, „Insolation in Relation to Cloudiness and Cloud Density“, *J. Meteor.*, Bd. 2, Nr. 3, S. 154–166, Sep. 1945, doi: 10.1175/1520-0469(1945)002<0154:IIRTCA>2.0.CO;2.
- [9] H. T. C. Pedro, D. P. Larson, und C. F. M. Coimbra, „A comprehensive dataset for the accelerated development and benchmarking of solar forecasting methods“, *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, Bd. 11, Nr. 3, S. 036102, Mai 2019, doi: 10.1063/1.5094494.
- [10] Erlangen National High Performance Computing Center, „Fritz parallel cluster (NHR+Tier3)“. Zugegriffen: 25. November 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://hpc.fau.de/systems-services/documentation-instructions/clusters/fritz-cluster/>
- [11] Erlangen National High Performance Computing Center, „Alex GPGPU cluster (NHR+Tier3)“. Zugegriffen: 25. November 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://hpc.fau.de/systems-services/documentation-instructions/clusters/alex-cluster/>
- [12] B. E. Boser, I. M. Guyon, und V. N. Vapnik, „A training algorithm for optimal margin classifiers“, in *Proceedings of the fifth annual workshop on Computational learning theory*, Pittsburgh Pennsylvania USA: ACM, Juli 1992, S. 144–152. doi: 10.1145/130385.130401.
- [13] L. Breiman, „Bagging predictors“, *Mach Learn*, Bd. 24, Nr. 2, S. 123–140, Aug. 1996, doi: 10.1007/BF00058655.
- [14] L. Breiman, „Random Forests“, *Machine Learning*, Bd. 45, Nr. 1, Art. Nr. 1, Okt. 2001, doi: 10.1023/A:1010933404324.

- [15] Y. Freund und R. E. Schapire, „A Decision-Theoretic Generalization of On-Line Learning and an Application to Boosting“, *Journal of Computer and System Sciences*, Bd. 55, Nr. 1, Art. Nr. 1, Aug. 1997, doi: 10.1006/jcss.1997.1504.
- [16] J. H. Friedman, „Greedy function approximation: A gradient boosting machine.“, *Ann. Statist.*, Bd. 29, Nr. 5, Okt. 2001, doi: 10.1214/aos/1013203451.
- [17] T. Chen und C. Guestrin, „XGBoost: A Scalable Tree Boosting System“, in *Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*, San Francisco California USA: ACM, Aug. 2016, S. 785–794. doi: 10.1145/2939672.2939785.
- [18] K. Pearson, *Mathematical Contributions to the Theory of Evolution. XIII. On the Theory of Contingency and Its Relation to Association and Normal Correlation*. Dulau and Co., 1904.
- [19] Y. LeCun u. a., „Backpropagation Applied to Handwritten Zip Code Recognition“, *Neural Computation*, Bd. 1, Nr. 4, S. 541–551, Dez. 1989, doi: 10.1162/neco.1989.1.4.541.
- [20] P. Mavaie, L. Holder, und M. K. Skinner, „Hybrid deep learning approach to improve classification of low-volume high-dimensional data“, *BMC Bioinformatics*, Bd. 24, Nr. 1, S. 419, Nov. 2023, doi: 10.1186/s12859-023-05557-w.
- [21] H. E. Beck, N. E. Zimmermann, T. R. McVicar, N. Vergopolan, A. Berg, und E. F. Wood, „Present and future Köppen-Geiger climate classification maps at 1-km resolution“, *Sci Data*, Bd. 5, Nr. 1, S. 180214, Okt. 2018, doi: 10.1038/sdata.2018.214.

Biodiversitäts-Guidelines auf wissenschaftlicher Basis für PV-Freiflächenanlagen

Stefan Gessert, Stefan Brunzel, Kerstin Wydra

Fachhochschule Erfurt

Abstract

Die Implementierung von Photovoltaik als ganzheitliche Alternative zu fossilen Brennstoffen ist für eine zukunftsfähige und ausreichende Energiegewinnung im Versorgungsmaßstab unerlässlich. Das positive Forschungsbild, mit lediglich sieben negativ bewertenden Publikationen von 43 wird durch ein weitreichendes Forschungsengagement gestützt. Die höchste Gewichtung der untersuchten Organismengruppen liegt bei Flora und Bestäubern. Negativen, herausgestellten Auswirkungen wie Wärmeinseleffekten oder Flächenzerschneidungen kann durch entsprechende und vorrausschauende Maßnahmen entgegengewirkt werden. Die bereits untersuchten Auswirkungen dienen als wissenschaftliche Basis für das erarbeitete Maßnahmensystem, durch welches eine adäquate Aufwertung des Ökosystems in den PV-Freiflächenanlagen erreicht werden soll.

1. Zielstellung

Implementierung von Freiflächen-Photovoltaik als zentrales Element zum Erreichen der Klimaschutzziele unter Berücksichtigung einer Symbiose aus Flächennutzung und Förderung des Naturhaushaltes.

2. Methodik

Literaturanalyse: Auswertung von 43 wissenschaftlichen Publikationen zum Thema der Auswirkungen von Freiflächen-Photovoltaikanlagen auf die Biodiversität.

Bewertungssystem: Entwicklung eines Codierungsschemas zur Einordnung der analysierten Literatur bezüglich ihrer Aussagen zu den Auswirkungen.

Ableitung einer Handlungsempfehlung: Betrachtung von untersuchten Organismengruppen mit besonderem Augenmerk auf bereits angewandte Maßnahmen zur Biodiversitätsförderung und Ableitung eines Maßnahmengesamtpaketes für einen Leitfaden.

3. Ergebnis

Die Analyse der 43 wissenschaftlichen Publikationen aus den Jahren 2003-2013 zeigte ein deutlich positives Ergebnis in Bezug auf die untersuchten Biodiversitäts- und Umweltkriterien mit einer Anzahl von 28 positiven und 8 mit neutral bewerteten Publikationen. Die höchste Gewichtung der untersuchten Organismengruppen lag bei Flora, Bestäubern und Avifauna. Bereits untersuchte Maßnahmen zur Erhöhung der Biodiversität und zum Umweltschutz und deren Auswirkungen dienen als Grundlage für die Ausarbeitung von detaillierten Anwendungsvorschlägen in einem Kreislaufsystem. Ein Leitfaden über fünf Phasen des Lebenszyklus einer PV-Freiflächenanlage mit jeweils zwei Ebenen wurde erstellt. Die übergeordneten Phasen gliedern sich in Standortauswahl, Planung, Bauen, Betrieb und Recycling und werden über phasengerechte Kategorien der 1. Ebene in insgesamt 68 entsprechend konkretisierte Maßnahmvorschläge der 2. Ebene aufgegliedert (Abb. 1).

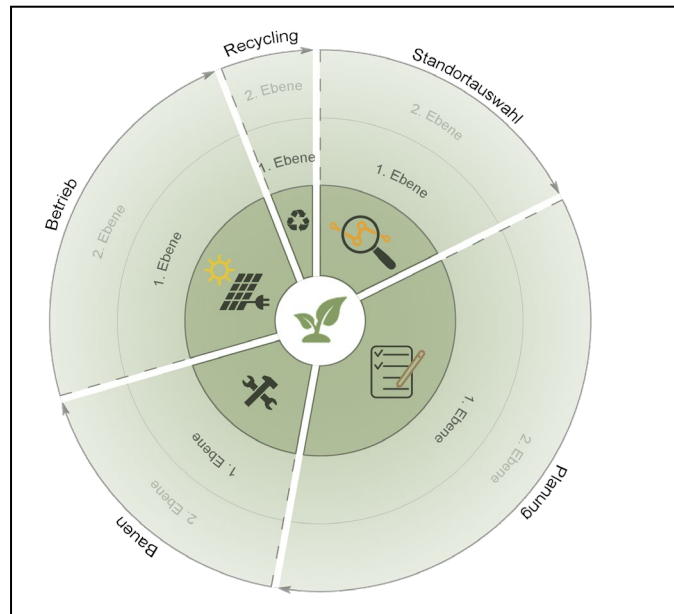


Abb. 1: Prozesshafter Ablauf der Maßnahmen zur Erhöhung der Biodiversität und zum Umweltschutz in PV-Freiflächenanlagen in fünf Phasen und auf jeweils zwei Ebenen

Negativen Auswirkungen wie Wärmeinseleffekten und Flächenzerschneidung kann durch entsprechende und vorrausschauende Maßnahmen entgegengewirkt werden. Insbesondere auf Konversionsflächen oder in Agrarlandschaften besteht ein hohes Potenzial zur Verbesserung der Ökosystemdienstleistungen. Auftretende Synergieeffekte steigern die Wirkungen der Einzelmaßnahmen. Die vorgeschlagenen Maßnahmen sollen als Standards für eine weiterführende Ausarbeitung einer DIN-SPEC zur Implementierung eines Biodiversitäts-Siegels für PV-Freiflächenanlagen dienen. Grundlegende Zielsetzung ist eine angemessene Wirtschaftlichkeit in Verbindung mit einer Aufwertung des ökologischen IST-Zustandes der betroffenen Fläche und deren Umfeld.

4. Literaturverzeichnis

Gessert Stefan (2023): Ökologische Flächenaufwertung im Einvernehmen mit nachhaltiger Stromproduktion durch Photovoltaik-Freiflächenanlagen. MA-Arbeit, FH Erfurt. (2023)

Autonome Nachführungssteuerung eines Parabolrinnen-Teststands mittels Microcontroller

Jäger, L.¹, Hart, S.¹, Reguera, R.¹, Grote-Ramm, W.¹, Neef, M.¹

¹ Zentrum für Innovative Energiesysteme (ZIES), Hochschule Düsseldorf, Düsseldorf

Abstract

Parabolrinnen nutzen parabolisch gekrümmte Spiegel, um die direkte Globalstrahlung auf ein Vakuum-Absorberrohr zu konzentrieren. Eine Effizienzsteigerung dieser Technologie wird durch eine vollständige Automatisierung der Sonnennachführung optimiert. Die an einem Parabolrinnen-Versuchsträger der Hochschule Düsseldorf realisierte Steuerung und Berechnung der Nachführung werden kontinuierlich über einen Microcontroller realisiert. Eine Kalibrierung der Parabolrinne im Labormaßstab zur Erkennung des Winkels erfolgt über Infrarotsensoren. Die Berechnung des Sonnenstandes, durch den Algorithmus, kann unabhängig von einer Stromzufuhr durch eine Real-Time-Clock bestimmt werden. Mittels Schrittmotor und Treiber verfährt die Parabolrinne in die errechnete Position. Die Feinausrichtung der Parabolrinne erfolgt über ein Verschattungsmodul und zwei Photowiderstände. Durch den Einsatz von 3D-gedruckten Bestandteilen sind die genutzten Komponenten kostengünstig und können standortunabhängig reproduziert werden. Durch das Zusammenspiel der Komponenten ist ein autonomer Einsatz möglich.

1. Einleitung

In ihren technischen Studiengängen bildet die Hochschule Düsseldorf (HSD) Fachkräfte aus, um umwelt- und klimaverträgliche Verfahren zur Energieumwandlung zu implementieren, zu optimieren und zu erforschen. Die systematische theoretische und praktische Ausbildung von Studierenden im Bereich erneuerbarer Energien leistet einen wichtigen Beitrag, um die Energiewende mit entsprechenden Fachkräften umzusetzen. In diesem Zusammenhang ermöglicht die Entwicklung eines Parabolrinnen-Teststands Studierenden, die Funktionsweise konzentrierender Solarkraftwerke selbst zu erproben und zu verbessern und dabei wichtige Prinzipien der ingenieurtechnischer Problemlösungsmethoden selbstständig anzuwenden. Seit Anfang 2023 wurde in mehreren studentischen Projekten ein entsprechender Versuchsträger für kleine Parabolrinnenkollektoren aufgebaut,

Die bisher fehlende Sonnennachführung des Teststandes mit daraus resultierenden hohen Cosinusverlusten [1] führt zu einer reduzierten Energieausbeute sowie Beeinträchtigungen bei der Handhabung und erfordert eine permanente Justierung der Parabolrinne von Hand.

Eine Sonnennachführung besitzt eine deutliche Effizienzsteigerung der Wärmeausbeute von mindestens 10% [2]. Bei kleinen Testständen wird der Gesamtwirkungsgrad durch die zusätzliche Stromversorgung der Steuerung gedämpft bzw. reduziert [2].

Ebenfalls ist durch die Implementierung eine kontinuierliche und minimale Überwachung einer Parabolrinne im modelmaßstab erreichbar [3].

Die vorliegende Arbeit stellt einen Ansatz zur Optimierung des Parabolrinnen-Teststands vor. Das Hauptziel besteht darin, die Cosinusverluste durch die Integration einer automatisierten Sonnennachführung mittels Microcontrollern, Sensorik und 3D-Druck zu minimieren. Dies soll die Effizienz des Teststands steigern und eine umfassende Automatisierung ermöglichen. Es sei darauf hingewiesen, dass sich diese Arbeit ausschließlich auf die Steuerung fokussiert, während nachgeführte Prozesse wie die Hydraulik des Wasserkreislaufs sowie Wärmetransport und Speicherung nicht in die Betrachtungen einbezogen werden.

2. Methode

Mittels Motorsteuerung und Antrieb wird die Parabolrinne ertüchtigt, eine Bewegung, um die Kippachse auszuführen. Die Positionierung erfolgt in den Schritten Kalibrierung, Positionierung zur Sonne und Feinjustierung mittels Verschattungsmoduls. Das genaue Vorgehen und die zugehörige Schaltung werden im Folgenden näher erläutert.

2.1 Motorsteuerung und Antrieb

Die Motorsteuerung und der Antrieb bilden eine zentrale Komponente für die Umsetzung der automatisierten Sonnennachführung am Parabolrinnen-Teststand.

Für den Antrieb wird ein Nema 11 Motor verwendet (**Abbildung 1**), welcher aufgrund seiner präzisen Steuerungsfähigkeit gewählt wurde. Die integrierte Übersetzung von 1:16 ermöglicht eine feine Abstimmung, genaue Bewegungen und ein hohes Drehmoment, um den Sonnenstand optimal zu verfolgen.

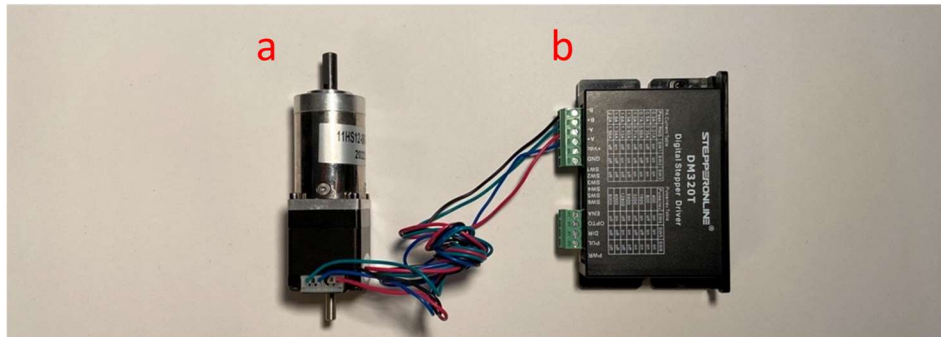


Abbildung 1 – Motor und Treiber
 a) Nema11 Getriebemotor (1:16)
 b) DM320T Treiber zur Ansteuerung des Schrittmotors über einen Microcontroller.

Wie in Abbildung 1 zu sehen, erfolgt die Steuerung des Motors durch einen Treiber, welcher die Signale des Microcontrollers interpretiert und den Motor entsprechend ansteuert. Genutzt wird ein einseitiger Antrieb, welcher durch eine gedruckte Motorhalterung, Schnecke und Zahnrad umgesetzt wird (Abbildung 2).

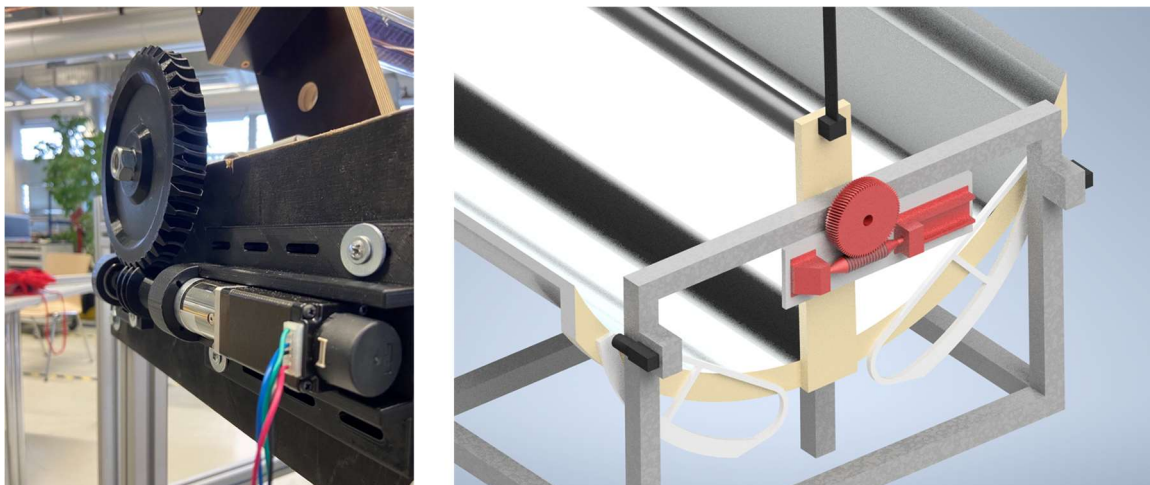


Abbildung 2 – Antrieb durch Schrittmotor mit gedruckter Halterung, Schnecke und Zahnrad (rechts in rot dargestellt).

2.2 Kalibrierung

Die Kalibrierung ist notwendig und bildet die Grundlage für die weitere Winkeleinstellung der Parabolrinne. Um eine genaue Ausrichtung der Parabolrinne zu gewährleisten, wird sie zunächst in ihre Ausgangsposition gebracht, welche als 0°-Position definiert ist. Diese Position ist so definiert, dass die Parabolrinne waagrecht nach oben ausgerichtet ist (Abb. 3). Voraussetzung hierfür ist, dass der gesamte Versuchstand auf ebenem Untergrund steht oder manuell entsprechend lotrecht ausgerichtet wird.

Zur genauen Identifizierung der 0°-Position des Spiegels relativ zur Halterung dienen zwei Infrarotsensoren, die links und rechts an der Parabolrinne angeordnet sind (3a). Diese Ausgangsposition wird durch die Reflexion von Infrarotstrahlen an weißen Reflektoren (3b), die seitlich an der Parabolrinne angebracht sind, erkannt. Ausgesandt werden die Infrarotstrahlen von den Infrarotsensoren. Die weißen Reflektoren sind in Abbildung 3 zur besseren Veranschaulichung rot dargestellt.

Zum Schutz und für die präzise Positionierung der Sensoren wird ein speziell entwickeltes 3D-gedrucktes Gehäuse verwendet, welches in Abbildung 4 zu sehen ist. Dieses Gehäuse sorgt nicht nur für einen zuverlässigen Schutz vor äußeren Einflüssen, sondern bietet auch Schutz vor Infrarotstrahlung der Sonne, die zu einer Fehlsteuerung der Infrarotsensoren führen kann. Nur in der 0°-Position wird keine von dem Infrarotmodul ausgesandte Infrarotstrahlung mehr in die Empfänger reflektiert, sodass diese Position eindeutig ist. Erst durch den kombinierten Einsatz von Infrarotsensoren, Reflektoren und dem Gehäuse ist die Kalibrierung möglich. Dieser Schritt bildet die Grundlage für die weitere Winkeleinstellung der Parabolrinne.

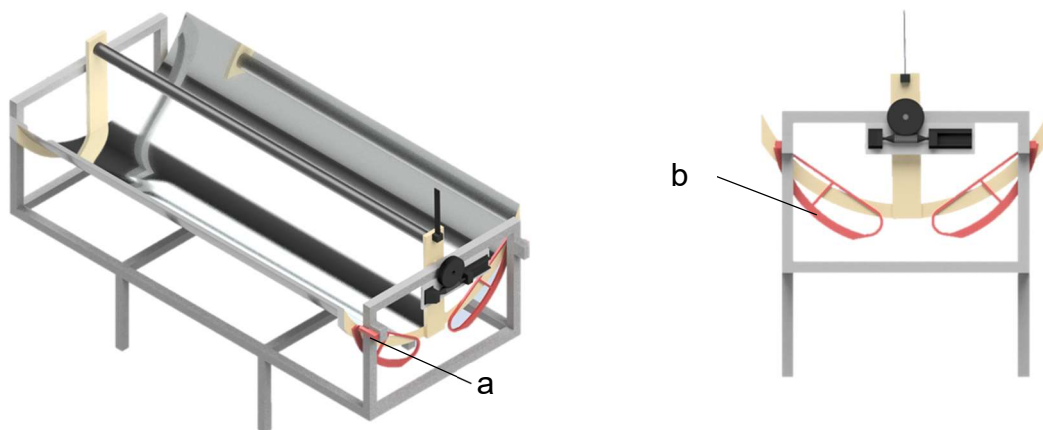


Abbildung 3 - Orthogonal- und Vorderansicht der Parabolrinne in 0°-Stellung mit Infrarotsensorhalterung (a) und Reflektoren (b)



Abbildung 4 – Detailzeichnung des Infrarotsensorgehäuse (a) und des Reflektors (b)

2.3 Berechnung des Sonnenstandes, Grobe Positionierung

Für die Grobpositionierung der Parabolrinne wird ein Sonnenstandsalgorithmus verwendet [4]. Damit kann die aktuelle Position der Sonne in Azimut (Horizontalwinkel) und Altitude (Höhen- oder Vertikalwinkel) berechnet werden (Abb. 5). Für die Berechnung werden neben der Uhrzeit auch das Datum, der Längen- und Breitengrad des Aufstellungsortes benötigt. Der Microcontroller bezieht die aktuelle Zeit und das Datum über eine RealTimeClock (RTC). Das RTC-Modul wird von einer Knopfzelle gespeist. Damit ist sichergestellt, dass die Uhrzeit auch bei einer Unterbrechung der Stromversorgung zuverlässig beibehalten wird. Die geografische Position des Aufstellungsortes der Parabolrinne in Länge und Breite muss vor der Inbetriebnahme manuell im Programm des Microcontrollers hinterlegt werden.

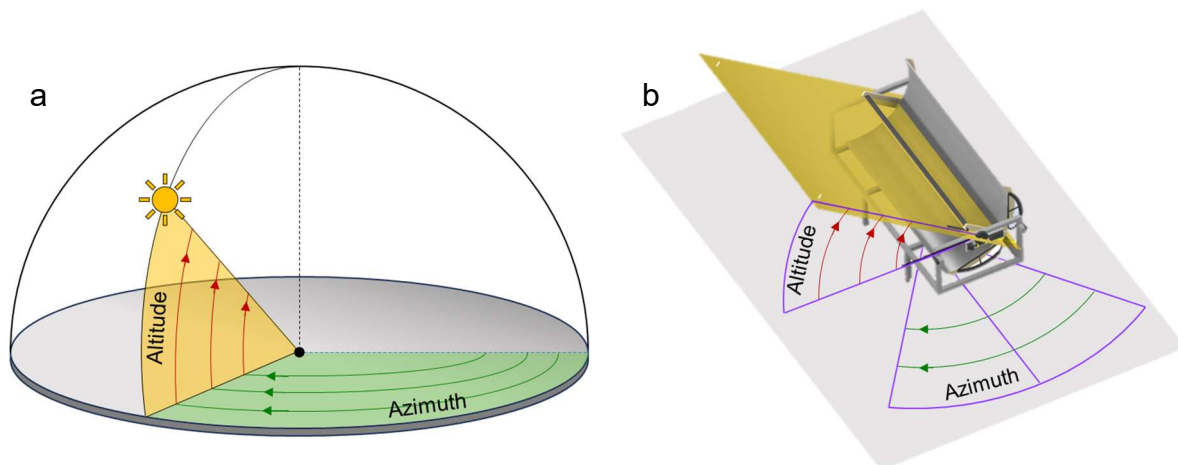


Abbildung 5 – Altitude und Azimut. a) Allgemeine Darstellung. b) Darstellung auf die Parabolrinne bezogen.

Durch die genaue Kenntnis des Standorts kann der Algorithmus Altitude und Azimut berechnen. Die Parabolrinne verfährt anschließend in berechnete vertikale Kippposition (Altitude). Der Azimut kann bei Parabolrinnen in der Regel nicht nachgeführt werden und wird daher auch für den vorhandenen Teststand nicht automatisiert.

2.4 Feinjustierung durch das Verschattungsmodul

Nach der algorithmischen Vorsteuerung der Parabolrinne bedarf es zum Ausgleich von Ausrichtungsfehlern und sonstigen Störgrößen einer geregelten Feinjustierung, um die solare Ausbeute zu maximieren.

Das Verschattungsmodul besteht aus zwei Photowiderständen, die in einem eigens entwickelten 3D-gedruckten Gehäuse platziert sind, und einem dazwischen angeordneten Schattenstab.

Die beiden Photowiderstände sind so positioniert, dass sie auf das direkt einfallende Licht der Sonne reagieren. Bei der Verschattung eines der Photowiderstände durch den Schattenstab wird die Parabolrinne so lange verfahren, bis beide Widerstände den gleichen Betrag aufweisen. Eine beispielhafte Grafik zu den Verschattungszuständen ist der **Abbildung 6** zu entnehmen.

Nachdem die Feinjustierung abgeschlossen ist, kann die Parabolrinne kontinuierlich der Sonne folgen, indem alle 5 Sekunden die Signale der Photowiderstände abgefragt werden.

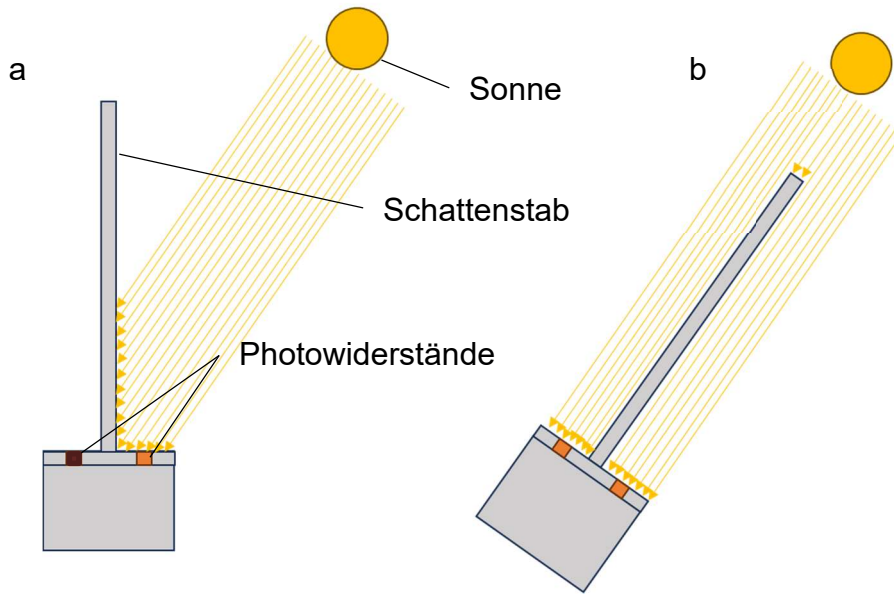


Abbildung 6 - Skizze des Verschattungsmoduls.
a) nicht ausgerichtet, b) ausgerichtet

2.5 Schaltung

Alle Module werden, wie in **Abbildung 7** zu sehen, über einen Microcontroller angeschlossen und gesteuert. Dieser wird selbst über ein 12V-Netzanschluss versorgt.

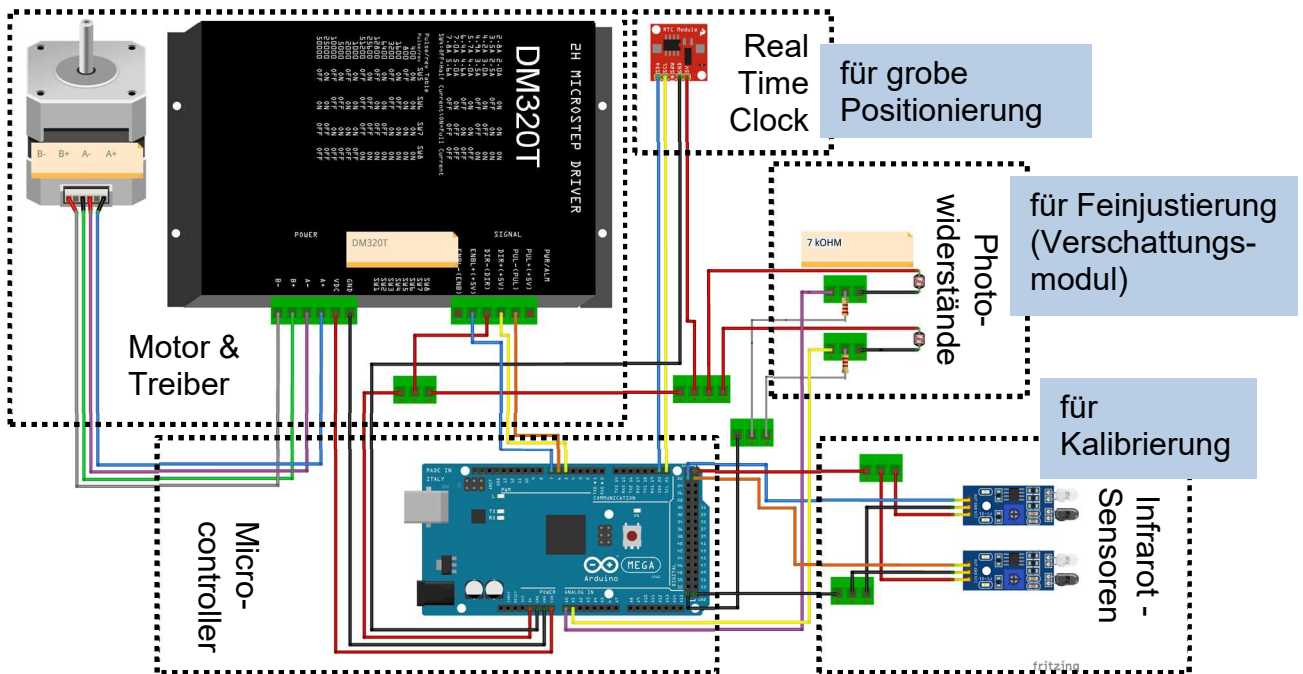


Abbildung 7 – Schaltbild der Nachführsteuerung

3. Ergebnisse

Die Implementierung der automatisierten Sonnennachführung ermöglicht eine gezielte Optimierung der Direktstrahlungsnutzung. Hierbei hat sich die Verwendung von belastungsresistentem Glykol modifiziertem Polyethylenterephthalat (PETG) Kunststoff für mechanisch beanspruchte Komponenten als erfolgreich erwiesen, um die Lebensdauer der 3D-gedruckten Bauteile deutlich zu verlängern. Trotz einer feinen Druckeinstellung zeigt sich jedoch ein gewisses Spiel zwischen Schnecke und Zahnrad, was bei der groben Winkel-Positionierung der Parabolrinne zu einer Winkeldifferenz von etwa $\pm 5^\circ$ führt. Die Kompensation dieses Fehlers erfolgt durch den Schattenstab, wodurch ein negativer Einfluss auf den Gesamtwirkungsgrad minimiert wird.

In Situationen, in denen die gedruckten Komponenten keiner mechanischen Belastung ausgesetzt sind, wird ein Polylactid (PLA) Filament verwendet. Diese weisen ebenfalls eine lange Lebensdauer auf und können standortunabhängig in kurzer Zeit reproduziert werden. Die Nutzung des 3D-Drucks erweist sich als besonders vorteilhaft für die Herstellung von Prototypenvarianten, da Lieferzeiten vermieden, Materialkosten gesenkt und schnell komplexe Formen hergestellt werden können.

In ersten Feldversuchen konnte die Funktion der Steuerung nachgewiesen werden (Abb. 9). Wolkenbildung und eine damit einhergehende Verschattung der Parabolrinne führen zu einer Pausierung der Nachführung. Erscheint die Sonne wieder, findet die Regelung erneut die optimale Position.

Windlasten, welche auf die Parabolrinne wirken, können zu einer einseitigen Verdrehung der Parabolrinne führen. Eine beispielhafte Verdrehung ist in Abbildung 8 dargestellt. Dieser ist zu entnehmen, dass die Seite, an welcher der Motor montiert ist, kaum Verdrehung aufweist. Hingegen ist die frei gelagerte Seite stärker verzerrt. Insbesondere bei hohen Windgeschwindigkeiten können zusätzliche Vibrationen oder Verbiegungen des Schattenstabes auftreten, was die präzise Ausrichtung beeinträchtigt. Eine präzise Montage der Infrarotsensoren und ihrer Gehäuse ist unerlässlich, da bei hohen Direct Normal Irradiance (DNI)-Werten und fehlerhafter Montage der Infrarotanteil der Strahlung die Sensoren stören kann.

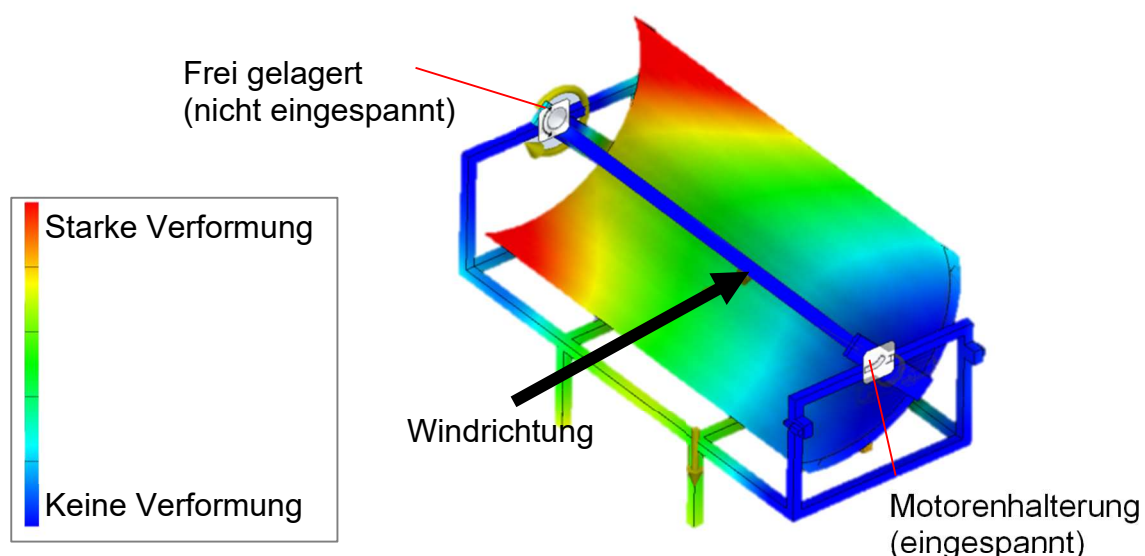


Abbildung 8 – Beispielhafte Verformung bei Windlasten der Parabolrinne. Effekt durch Einspannung auf Seiten der Motordrehachse bei einseitiger freier Lagerung.

Die Automatisierung trägt zur Effizienzsteigerung der Parabolrinne bei. Durch die Steuerung ist außerdem die Möglichkeit geschaffen, mehrere Sicherheitsaspekte zu berücksichtigen, indem z.B. bei einer thermischen Überlast und fehlendem Abnehmer die Parabolrinne aus der Sonne verfährt. Um die Gesamtkonstruktion weiter zu optimieren, sind dazu Überlegungen zur Windlastenreduzierung und die Implementierung eines Sicherheitssystems in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit notwendig.



Abbildung 9 – Parabolrinne im Feldversuch.
links: Verfahren der Parabolrinne in die 0°-Stellung. rechts: Ausrichtung des Höhenwinkels (Altitude)

4. Zusammenfassung

Für den vorhandenen Parabolrinnen-Versuchsstand der Hochschule Düsseldorf konnte eine Motorenansteuerung und Sonnennachführung der Parabolrinne im Labormaßstab erfolgreich umgesetzt werden. Die grobe Altitude-Ausrichtung der Parabolrinne wird dabei durch die Implementierung eines Schattenmoduls kompensiert.

Die Automatisierung der Sonnennachführung hat eine erhöhte Effizienz und Autonomie des Parabolrinnen-Versuchsträgers zur Folge. Durch die Feinjustierung mittels Schattenstab und Fotowiderstände können Positionierungsfehler, wie sie z.B. durch das Spiel zwischen Schnecke und Zahnrad entstehen können, kompensiert werden. Die Verwendung belastungsresistenter Materialien, insbesondere des PETG-Kunststoffs, zeigt sich als erfolgreiche Strategie zur Verbesserung der Lebensdauer der gedruckten Komponenten. Zudem werden gut verfügbare und kostengünstige Materialien verwendet, welche aufgrund des Herstellungsprozesses mittels 3D-Druck leicht zu produzieren sind. Die Umsetzung der Nachführung kann auf dieselbe Weise leicht modifiziert werden und bietet sich dadurch auch für den einfache Nachbau des Systems durch andere Hochschulen an.

Windlasten besitzen einen entscheidenden Einfluss. Eine mögliche Verformung der Parabolrinne und Vibrationen des Schattenstabes durch Windlasten erfordern eine weitere Optimierung der Konstruktion. Durch Verbesserung der Formsteifigkeit der Spiegelaufhängung und die Implementierung eines Sicherheitssystems in Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit kann die Robustheit des Systems weiter gesteigert werden.

Literaturverzeichnis

- [1] Qu, W., Wang, R., Hong, H., Sun, J. & Jin, H. Test of a solar parabolic trough collector with rotatable axis tracking. *Applied Energy*, 207, 7–17. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.05.114>, (2017).
- [2] Mousazadeh, H., Keyhani, A., Javadi, A., Mobli, H., Abrinia, K. & Soltanzadeh, A. , A review of principle and sun-tracking methods for maximizing solar systems output. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 13(8), 1800–1818. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.01.022>, (2009)
- [3] Odeh, S. & Abu-Mulaweh, H. I. Design and development of an educational solar tracking parabolic trough collector system. *Global Journal of Engineering Education*. <http://www.wiete.com.au/journals/GJEE/Publish/vol15no1/03-Abu-Mulaweh-H.pdf>, (2013).
- [4] Willmann-Bell, Richmond. *Astronomical Algorithms*. 2nd ed., 2nd printing., ISBN 0-943396-61-1, (2000).

Ein modulares LoRa-Sensornetzwerk für Forschungszwecke und industrielle Messdatenerfassung

Klaus-Peter Neitzke, Heidi Schell

Institut für Informatik, Automatisierung und Elektronik (IAE), Hochschule Nordhausen

Abstract

In dieser Arbeit wird ein Sensornetzwerk beschrieben, das für Forschungszwecke und für die industrielle Messdatenerfassung entwickelt wurde. Es ist modular aufgebaut und kann unterschiedliche Sensoren verwenden. Optionale Repeater ermöglichen eine Vergrößerung der Reichweite und die Gateways stellen die Verbindung zum Internet sicher. Die von den Sensoren gemessenen Daten können in Datenbanken oder in Filesystemen abgelegt werden und stehen zur Auswertung an Arbeitsplätzen mit Internetanbindung zur Verfügung. In umgekehrter Richtung können die Sensoren vom diesem Arbeitsplatz ferngewartet und konfiguriert werden. Die Kommunikation innerhalb des Sensornetzwerkes arbeitet drahtlos mit LoRa-Funkmodulen auf der Frequenz 868 MHz.

1. Messaufgabe – Was soll das System leisten

Die Aufgabe des Sensornetzwerkes besteht in dem Erfassen von unterschiedlichen Messwerten an unterschiedlichen Orten, mit dem Ziel diese gemeinsam auf einem Server zur Weiterverarbeitung und Veranschaulichung zur Verfügung zu stellen.

Das System soll unterschiedliche Sensoren an unterschiedlichen Orten erfassen können. Die Sensoren senden ihre Messwerte zu festgelegten Zeiten drahtlos zu einem Gateway, optional werden die Werte von einem oder mehreren Repeatern, die sich zwischen dem Sensor und dem Gateway befinden, weitergeleitet. Ebenso ist vorgesehen, dass die Sensoren aus der Ferne konfiguriert werden können. Dazu kann der Sensor zu festen Zeiten Konfigurationsdaten vom Server lesen. Die Übermittlung dieser Konfigurationsdaten läuft in entgegengesetzter Richtung zu den Messwerten, ist drahtlos und kann ebenfalls über die Repeater geleitet werden.

Das System soll modular aufgebaut werden und es soll sich für Ausbildungszwecke an Schulen und Hochschulen eignen. Ebenso soll es mechanisch robust und softwareseitig sicher sein. Der Grund für die Modularität ist, dass es immer die Möglichkeit geben muss, neue Sensoren und auch neue Übertragungsmodule einzubinden.

2. Abgrenzung – Was muss das System nicht können

Es wird nicht gefordert, dass das System kompatibel zu fertigen angebotenen Funksensoren, aufgebaut aus Sensoren und Funkmodulen, ist. Die Spezifikation und Kommunikation dieser Geräte kann sich ändern, dabei ist nicht immer sichergestellt, dass man das eigene Sensornetzwerk nachträglich anpassen kann. Daher wird hier die Modularität verfolgt, die Sensoren sind von der Kommunikation getrennt.

Weiterhin wird nicht gefordert, dass die Sensoren zu jeder Zeit konfiguriert werden können. Dazu wäre es notwendig, dass sie immer empfangsbereit sind. Darauf wird verzichtet. Es wird sich darauf beschränkt, dass die Sensoren neue Konfigurationswerte empfangen, wenn sie an regelmäßigen

Zeiten Messwerte senden. Selbstverständlich kann das Kommunikationsintervall, das üblicherweise mehrere Minuten betragen sollte, dabei so stark reduziert werden, dass praktisch eine Messung und Konfiguration in Echtzeit vorliegt.

Im hier beschriebenen Sensornetzwerk wird sich nicht auf einen Repeater begrenzt. Alle Repeater können untereinander und mit den Sensoren und dem Gateway kommunizieren, siehe Abbildung 1.

3. Beschreibung des Gesamtsystems

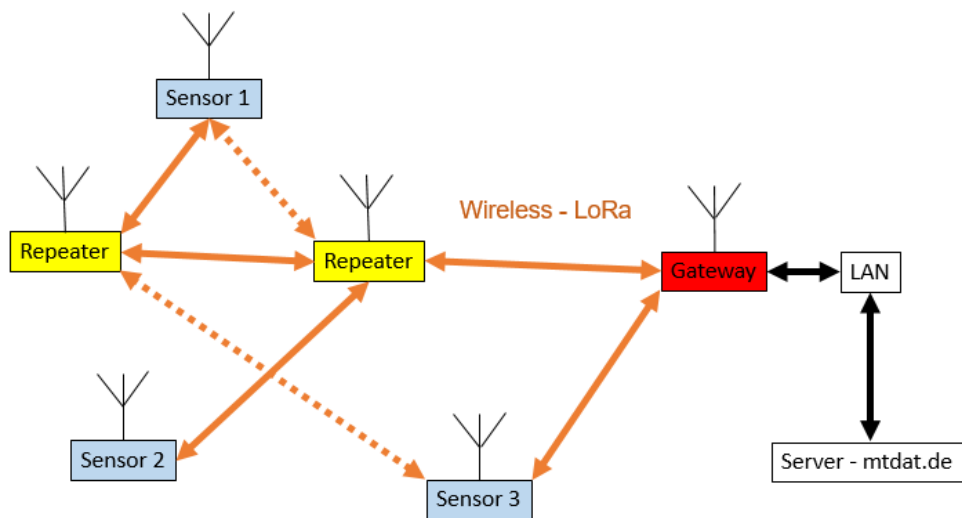


Abb. 1: Aufbau des Gesamtsystems

In dem in Abbildung 1 dargestellten möglichen Gesamtsystem werden die im Sensor verarbeiteten Daten über eine LoRa-Funkverbindung zu einem Gateway übertragen. Optional werden die Daten von einem oder mehreren Repeatern entgegengenommen und weitergesendet. Im Gateway werden die Daten in eine vorhandene LAN-Verbindung weitergegeben. Die Infrastruktur des Internets wird hier nicht beschrieben, sie wird als vorhanden vorausgesetzt. Die Hardwareüberlegungen hier im Projekt enden immer an einer vorhandenen LAN-Verbindung. Die Daten gehen rückwärts vom Nutzer zum Sensor denselben Weg. Es ist sichergestellt, dass Nachrichten nicht zwischen den Repeatern hin- und herpendeln, siehe Kapitel 5.2. Auch ist sichergestellt, dass das Gateway nur die zuerst eingetroffene Nachricht mit Messwerten zum Server weiterleitet. Falls die Nachricht auch von einem Repeater empfangen und weitergeleitet wird, erreicht die identische Nachricht das Gateway kurze Zeit später. Diese Nachricht wird nicht weitergeleitet. Die Vorgehensweise ist wie bei dem Repeater, siehe Kapitel 5.2.

4. Erprobung der drahtlosen LoRa-Verbindung (Reichweiten, Antennen...)

Bei der drahtlosen LoRa-Verbindung handelt es sich um eine relativ neue Technik, für die noch nicht große Erfahrungen vorlagen. Darum wurde die mögliche Anwendung und Eignung innerhalb dieses Projektes untersucht. Für die ersten Tests wurde ein Setup aufgebaut, das jeweils ein LoRa-Funkmodul und ein Mikrokontroller enthält, siehe Abbildung 2. Die Arbeitsfrequenz beträgt 868 MHz und ist anmeldefrei und ohne Gebühren betreibbar.

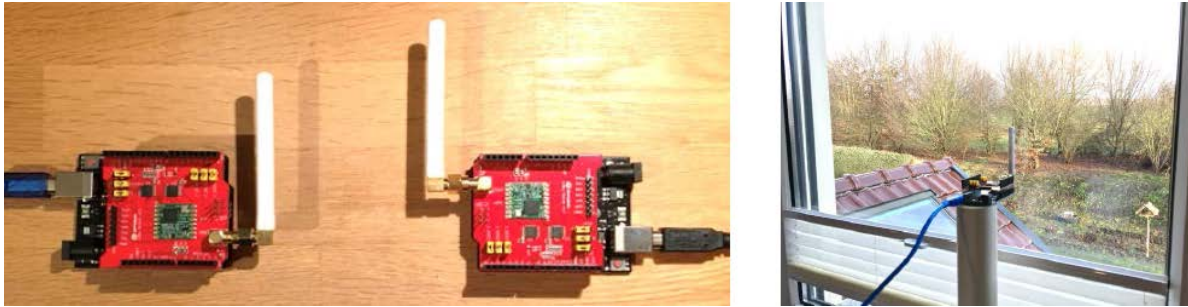


Abb. 2: Testsetup für die LoRa-Kommunikation

Mit diesem Aufbau war ein permanenter Datenaustausch möglich. Die Reichweite mit zwei kurzen Stummelantennen betrug jedoch nur etwa 500 Meter innerhalb von Gebäuden. Um die Handhabbarkeit zu erproben, wurde weitere Einheiten gebaut und erprobt. Sie können sehr kostengünstig und klein aufgebaut werden. Weiterhin wurden größere Antennen mit einem Gewinn erprobt. Die Antennen sind am Markt verfügbar oder sie werden selbst konstruiert und gebaut. Mit ihnen konnte die Reichweite vergrößert werden. Tests mit einer Stummelantenne auf der einen Seite und einer Kollinearantenne auf der Gegenseite verliefen erfolgreich und es konnten Reichweiten von über 2 km erreicht werden. Beim Einsatz der Kollinearantenne auf beiden Seiten wird eine noch größere Reichweite erwartet. Wichtig für den Betrieb ist, dass für diese Datenverbindung keine Anmeldungen erfolgen oder Gebühren gezahlt werden müssen, da diese Funkverbindung im freien ISM – Band (Industrial, Scientific and Medical Band) arbeitet. Es sind eine Reihe von austauschbaren Funkmodulen auf dem Markt verfügbar, sodass man sich hier nicht auf ein Modell festlegen muss. In dieser Arbeit wurden die Module RFM95W, siehe [1], verwendet. Sie haben eine maximal einstellbare Sendeleistung von 20 dBm = 100 mW.

5. Bausteine des Systems mit ihre Hard- und Software

An dieser Stelle werden die einzelnen Komponenten Sensoren, Repeater, Gateway, Brücke zu einem WLAN-Netz und dem Server in Hardware und Software beschrieben. Der Fokus bei der Realisierung der Hardware war erstens, dass kostengünstige, einfache Sensoren benutzt werden können. Sie sollten unter 50 € kosten. Zweitens sollten auch robuste industrielle Sensoren mit eingebunden werden können. Diese haben robuste industrietaugliche Gehäuse, siehe Abbildung 3. Diese bestehen aus 2 mm dicken GFK und werden mit Zapfen verharzt. Die elektronischen Komponenten werden an eingeharzten Metallmuttern befestigt. Je nach thermischer Umgebung befinden sich Lüftungslöcher im Gehäuse.

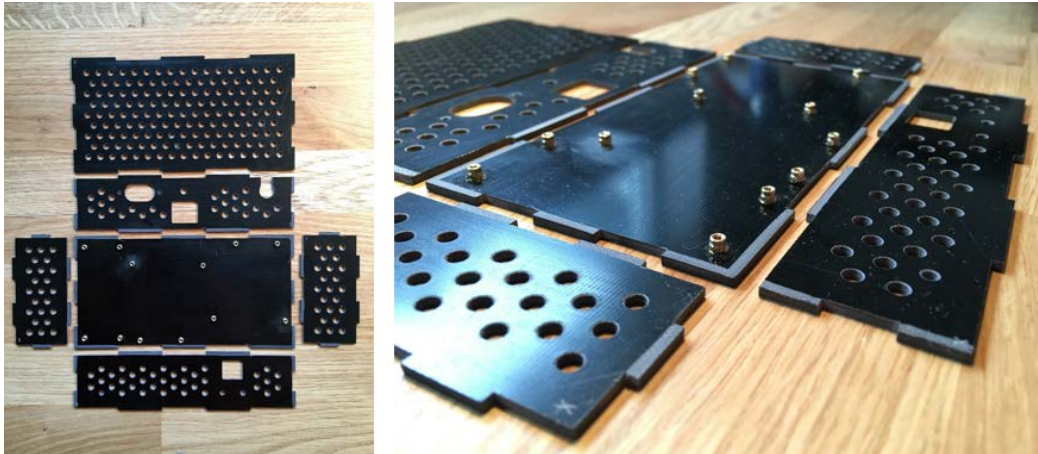


Abb. 3: Aufbau eines robusten industrietauglichen Gehäuses

5.1 Sensoren

In der Abbildung 4 ist ein typischer Sensor dargestellt. Das System besteht aus einem Mikrocontroller, dem LoRa-Funkmodul, dem Netzteil und dem eigentlichen Sensor. Hierfür eignen sich gut Breakoutboards. Diese erhalten eine Betriebsspannung und die Messwerte können über lineare Analogkanäle oder einen I2C-Bus gelesen werden. In dem 94 x 77 x 40 mm großen Gehäuse befindet sich ein Netzteil von 230 Volt auf 8 Volt Gleichspannung zur Versorgung des Controllers und des LoRa-Funkmodules. Als Controllerplatine wurde hier ein Arduino-UNO benutzt. Darauf ist ein Dragino-LoRa-Shield, siehe [2] gesteckt. Dieses arbeitet mit dem Modul RFM95W, siehe [1]. Der Sensor befindet sich außerhalb des Gehäuses, siehe Abbildung 4.

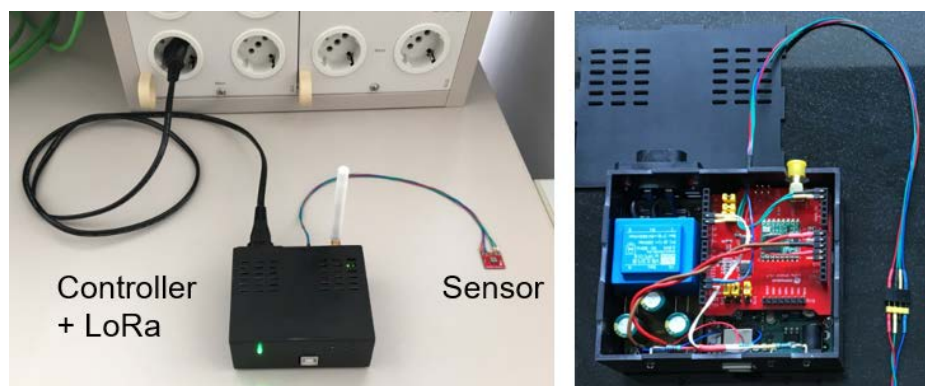


Abb. 4: Aufbau eines typischen Sensors

Jeder Sensor kann Nachrichten senden, die aus den 15 Zeichen 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 . - [] | bestehen. Eine Nachricht beginnt mit dem Zeichen [, gefolgt von einer eindeutigen Identifikationsnummer. Dann folgt die Trennung |, an die sich ein oder mehrere Messwerte anschließen. Diese werden durch das Zeichen | voneinander getrennt. Das ergibt diese Struktur: [Identifikationsnummer|Messwert1|Messwert2|...]. So wird der Sensor mit der Identifikationsnummer 60 den Messwert 21.5 so senden: [60|21.5]. Wenn ein Sensor drei Messwerte erfasst, kann die

Meldung z.B. so aussehen: [60|21.5|20.3|50.4]. Der Vorteil dieser Vorgehensweise ist, dass man auch als Mensch Meldungen in Datenströmen noch gut erfassen kann. In dieser Meldung ist kein Zeitstempel enthalten. Er könnte hinzugefügt werden, jedoch reicht es für viele Anwendungen aus, dass der Server beim Erhalten eines Messwertes von einem Sensor seine eigene Systemzeit hinzufügt. Typischerweise sendet ein Sensor seine Messwerte im Abstand von mehreren Minuten.

Wenn die Messung gesendet wurde, hört der Sensor noch einige Sekunden, um neue mögliche Konfigurationswerte zu erhalten. Das können Einstellwerte für den Sensor sein oder auch die Abtastzeit zwischen zwei Messungen. Die Meldung für eine neue Konfiguration des Sensors hat eine ähnliche Struktur, wie die für die Messungen.

Jeder Sensor kann Nachrichten empfangen, die aus den 15 Zeichen 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 . - () | bestehen. Der Unterschied sind nur die runden anstelle der eckigen Klammern. Sie bedeuten, dass es sich um Konfigurationswerte handelt. Eine Nachricht beginnt mit dem Zeichen (, gefolgt von einer eindeutigen Identifikationsnummer. Dann folgt die Trennung |, an die sich ein oder mehrere Konfigurationswerte anschließen. Diese werden durch das Zeichen | voneinander getrennt. Das ergibt diese Struktur: (Identifikationsnummer|Konfigurationswert1|Konfigurationswert2|...). So wird der Sensor mit der Identifikationsnummer 60 den Konfigurationswert 21.5 so empfangen: (60|21.5). Wenn ein Sensor drei Konfigurationswerte erhalten, kann die Meldung z.B. so aussehen: (60|21.5|20.3|50.4).

Nachdem Messwerte gesendet und Konfigurationswerte empfangen wurden, kann der Sensor optional in einen energiesparenden Ruhemodus gehen. Aus diesem erwacht er erst wieder nach dem vorgegebenen Messintervall. Dieser Ruhemodus erlaubt sehr lange Laufzeiten eines Sensors bei Batteriebetrieb.

5.2 Repeater

Der Repeater muss alle Nachrichten, die Messwerte oder Konfigurationswerte enthalten, empfangen und unverändert wieder versenden. Er muss daher nur die 17 Zeichen 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 . - [] () | weiterleiten.

Als Standort für den Repeater eignet sich eine Position, von der aus alle Sensoren und das Gateway über die Funkverbindung zu erreichen sind. Der Repeater kann in der hier vorgestellten Arbeit nicht in einen energiesparenden Ruhemodus gehen, weil für ihn nicht abzusehen ist, wann die Sensoren Nachrichten mit den Messwerten versenden und wann Konfigurationswerte zurückgesendet werden. Der Repeater hat den gleichen mechanischen Aufbau wie der Controller und das LoRa-Shield, siehe Abbildung 4. Lediglich der angeschlossene Sensor fehlt.

Da ein Repeater alle eingehenden Nachrichten wieder versendet, muss sichergestellt werden, dass eine Nachricht nicht zwischen zwei Repeatern hin- und herpendelt. Hierzu wurde in jedem Repeater eine Sperrliste implementiert. Wenn ein Sensor mit einer definierten Identifikationsnummer einen Messwert sendet, wird dieser nur vom Repeater weitergeleitet, wenn seit der letzten Meldung eine vorgegebene Sperrzeit, z.B. von 60 Sekunden, vergangen ist. So ist sichergestellt, dass Messwerte, die alle Minuten versendet werden, vom Repeater weitergeleitet werden. Ein Echo bzw. eine Rückkopplung von einem anderen Repeater geht nach Sekunden ein und wird nicht erneut weitergeleitet. Es gibt eine Sperrliste für Messwerte und eine für Konfigurationswerte. Die Meldungen mit den Konfigurationswerten liegen kurz nach den Meldungen mit den Messwerten vor und werden weitergeleitet, weil die Sperrlisten getrennt sind.

5.3 Gateway + Brücke zu einem WLAN-Netz

Zur Erprobung des Gesamtsystems wurden eine Reihe von Gateways konstruiert und aufgebaut, siehe Abbildung 5. Diese Gateways stellen die Verbindung zwischen der LoRa-Funkverbindung und dem LAN- Anschluss her. Die Daten, die von der LoRa-Funkverbindung empfangen werden, werden zur LAN-Verbindung gesendet und umgekehrt. Es werden keine Daten gespeichert oder zwischenverarbeitet. Bei der Konstruktion der Gateways wurde auf eine robuste Bauweise geachtet, da diese Gateways auch für den robusten industriellen Einsatz geeignet sein sollen.

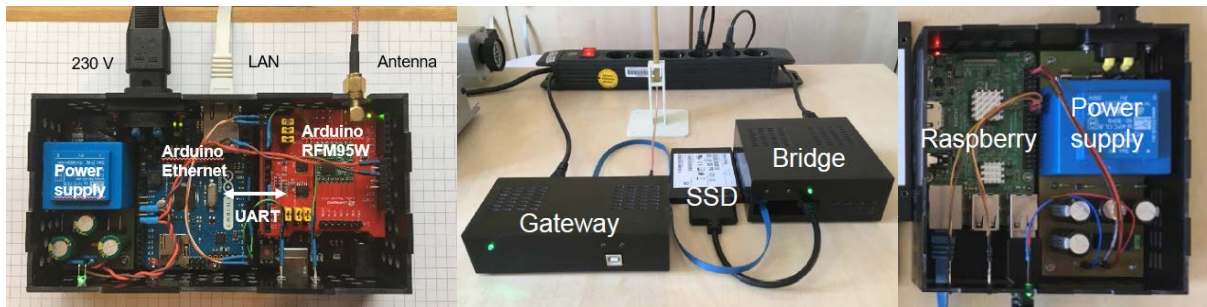


Abb. 5: Aufbau des Gateways und der Brücke

Die Kollinearantennen bestehen aus einzelnen resonanten Teilstücken, die sich in einem GFK-Rohr befinden. Die selbst konstruierten Antennen hatten im Test eine knapp bessere Reichweite als die verfügbare Antenne LoRaMikroTikmit mit den angegeben 6.5 dBi Gewinn, siehe mitte oben in der Abbildung 5. Der Datenstrom im modularen Gateway ist in Abbildung 6 gezeigt.

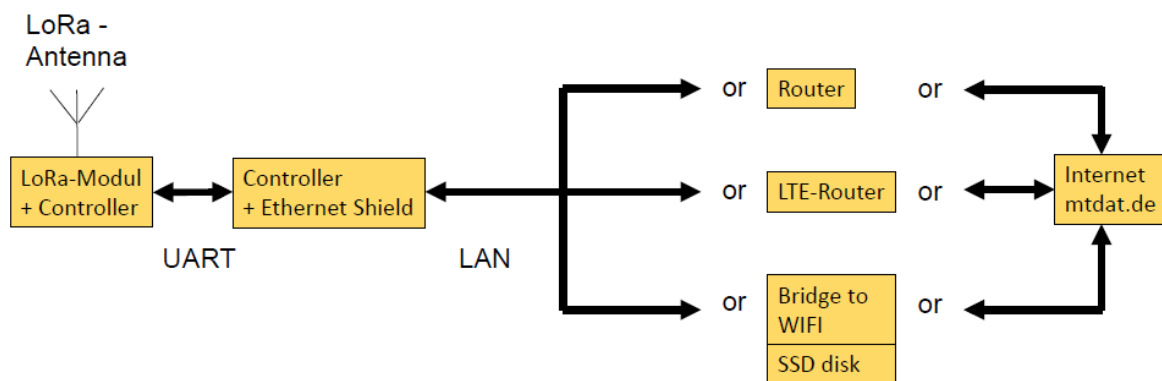


Abb. 6: Aufbau des Datenflusses im Gateway

Ein typischer Sensor kommuniziert über die LoRa-Antenne über das Lora-Modul mit dem Controller. Dieser ist über eine bidirektionale UART-Verbindung mit einem zweiten Controller verbunden, der über ein Ethernet-Shield verfügt. Das LAN-Kabel an dem Ethernet-Shield kann wahlweise mit einem Router oder einem LTE-Router oder einer Brücke zu einem WLAN verbunden werden. In der hier beschriebenen Umsetzung wurde der Weg über die Brücke zu einem WLAN gewählt, da in Firmen oft kein Zugang über ein LAN-Anschluss erwünscht ist, aber ein WLAN verfügbar ist. Im erprobten Fall ist

die Brücke mit dem Eduroam, siehe [3], verbunden. Weiterhin befindet sich in der Brücke eine SSD-Karte. Sie hat eine größere Schreib-Lese-Stabilität, als die als die im Raspberry eingesetzten Mikro-SD-Karten. Auf dem in der Brücke eingesetzten Raspberry können zusätzlich Zwischenspeicher und Server installiert werden.

5.4 Server

Die Anforderung an den Server ist das Ablegen und Darstellen von Messdaten und in entgegengesetzter Richtung die Übermittlung von Konfigurationsdaten an das Messgerät. Dazu wurde der Ablauf in der Abbildung 7 umgesetzt.

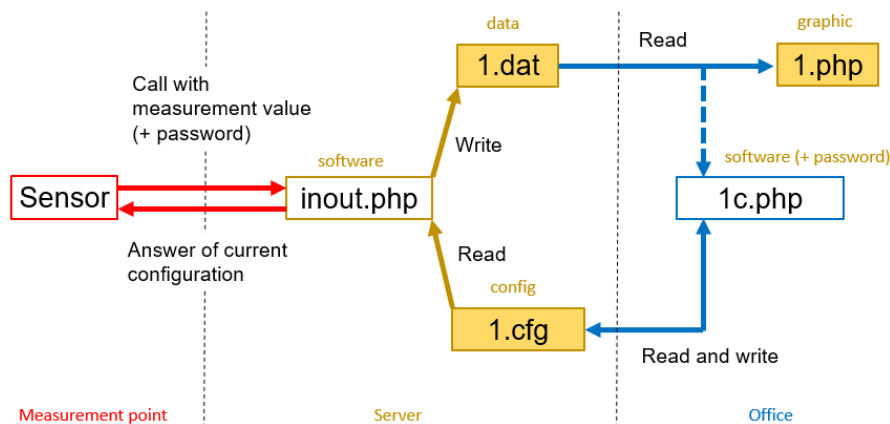


Abb 7: Aufbau des Datenflusses zwischen Sensor und Server

Wenn ein Sensor mit einer Identifikationsnummer, hier z.B. 1, einen Messwert zum Gateway sendet, wird von Gateway aus die Datei `www.inout.php` mit den Parametern Identifikationsnummer, Messwert und einem Passwort aufgerufen, z.B. `www.mtdat.de/inout.php?id=1&value=49.3&password=geheim`. Der Wert 49.3 wird daraufhin in die Datei `www.mtdat.de/1.dat` geschrieben und die Verläufe können mit der Datei `www.mtdat.de/1.php` dargestellt werden. Die grafische Darstellung wurde mit JpGraph verwirklicht, siehe [4]. In der umgekehrten Richtung antwortet die Datei `www.mtdat.de/inout.php` mit dem Inhalt der Datei `www.mtdat.de/1.cfg` für den Sensor mit der Identifikationsnummer 1. Weiterhin kann sich auf dem Server eine Datei `www.mtdat.de/1c.php` befinden. Sie übernimmt optional die Graphik aus der Datei `www.mtdat.de/1.php` und sie kann die Konfiguration in der Datei `www.mtdat.de/1.cfg` lesen und schreiben. Dazu ist die Eingabe eines Passwortes notwendig. Die Datei `www.mtdat.de/1.cfg` kann aber auch manuell editiert werden. Bei jedem Aufruf der Datei `www.mtdat.de/inout.php` von einem Sensor mit der Identifikationsnummer 1 wird der momentan vorhandene Inhalt der Datei `www.mtdat.de/1.cfg` zum Sensor zurückgesendet. Es kann dort verarbeitet werden.

6. Test des Gesamtsystems

Momentan arbeitet das Gesamtsystem mit bis zu 10 angeschlossenen Sensoren, siehe die Übersicht `mtdat.de` und in der Übersicht in der Abbildung 8.

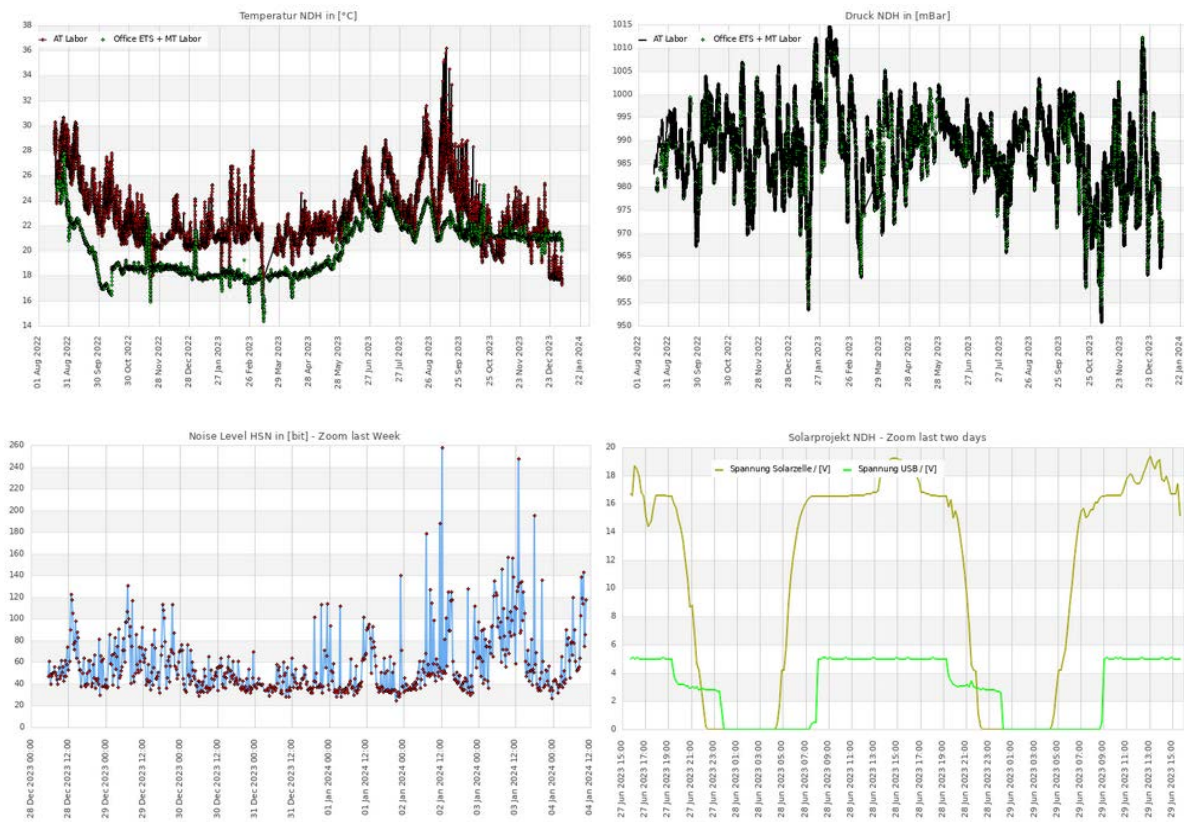


Abb. 8: Darstellung einiger Messwerte auf der Seite mtdat.de

Dabei wurden in der Erprobung Sensoren für Temperatur, Druck, Spannung, Beschleunigung, Drehraten, Netzfrequenz, Laser-Doppler-Anemometer und Schallstärken erfolgreich eingesetzt. In der Abbildung 8 sind einige dieser Messwerte angezeigt. Auf der Seite mtdat.de werden die Messwerte kontinuierlich erweitert. Die Sensoren befinden sich dabei bis zu einigen Kilometern von der Hochschule Nordhausen entfernt. Die Messwerte werden über Repeater mit guten Funkstandorten in Abbildung 1 zum Gateway in der Hochschule Nordhausen weitergeleitet.

In entgegengesetzter Richtung können Konfigurationsdaten der Sensoren und Repeater über die Konfigurationsmeldungen neu eingestellt werden. Das funktioniert momentan über einfache funktionelle Tools, siehe Abbildung 9. Darin werden die Messdaten und die momentan gültigen Konfigurationsdaten dargestellt. Neue Konfigurationsdaten können im unteren Bereich zusammen mit einem Passwort eingegeben werden. Werden diese abgesendet, stehen die neuen Konfigurationsdaten in der zur Identifikationsnummer gehörigen Datei, z.B. www.mtdat.de/1.cfg zur Verfügung, werden aber erst beim nächsten Aufruf zum Sensor oder Repeater gesendet. Auch die Repeater haben eine Identifikationsnummer und können aus der Ferne konfiguriert werden.

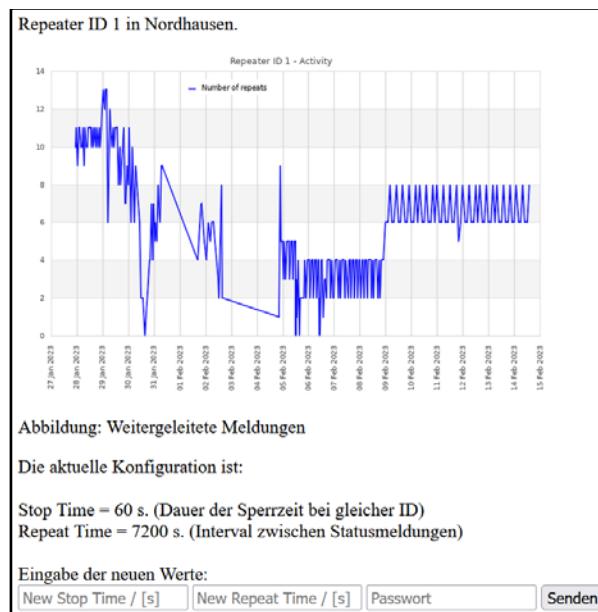


Abb. 9: Darstellung des Konfigurationstools www.mtdata.de/1c.php

Momentan läuft das gesamte Messsystem seit über einem Jahr ohne Ausfälle. Es hat auch mindestens ein ungeplanter Stromausfall stattgefunden, nach diesem sind die Sensoren, Repeater und Gateways selbstständig wieder hochgefahren. Die Brücke zwischen dem Gateway und dem WLAN-Netz wurde noch nicht abgeschaltet. Daher liegen für sie Erfahrungen zum Hochfahren nach einem Stromausfall vor.

7. Geplante Weiterentwicklung – Ausblick

Momentan wird daran gearbeitet, weitere Sensoren einzubinden und zu erproben. Das Ziel besteht darin, die Messwerterfassung, einschliesslich der Konfiguration der Messgeräte, den Mitarbeitern und Projektpartnern der Hochschule Nordhausen für die Forschungszwecke und Messaufgaben anzubieten. Der Fokus dabei ist die Bereitstellung von modularen günstigen Sensormodulen. Weiterhin wird momentan daran gearbeitet, einzelne Sensoren und den Repeater mit einem Solarmodul oder einem Windrad zu versorgen. Für eine weitere Entwicklung ist auch die Eigenentwicklung der elektronischen Komponenten vorgesehen, da sich die Messwerterfassung momentan aus verfügbaren Baugruppen zusammensetzt. Die Eigenentwicklung ist aber erst bei einer grossen Stückzahl sinnvoll, würde aber zu geringeren Kosten und weniger Baugröße führen.

8. Literaturverzeichnis

- [1] <https://www.hoperf.com/data/upload/portal/20190801/RFM95W-V2.0.pdf>
- [2] <https://www.dragino.com/products/lora/item/102-lora-shield.html>
- [3] <https://eduroam.org>
- [4] <https://jppgraph.net>

Anmerkungen zu Holz(pellet)-Heizungen

Prof. a.D. Dr.-Ing. Bruno Spessert, ehemals Ernst-Abbe-Hochschule Jena

Abstract

Holz(pellet)-Heizungen können einen nicht unwesentlichen Beitrag zur „Wärmewende“ liefern. Da Holz mit vergleichsweise geringem Aufwand gespeichert werden kann, eignet sich aus der Holzverbrennung gewonnene Wärme insbesondere zur Abdeckung von Wärmespitzen z.B. an besonders kalten Tagen.

Allerdings fehlen ausreichend strenge gesetzliche Vorgaben und staatliche Kontrollen, die sicher stellen, dass das zu Pellets verarbeitete Holz aus nachhaltiger Forstwirtschaft stammt. Ebenso fehlt bisher eine Holz-Rahmenstrategie, die Priorisierungen bei der Nutzung der Ressource Holz erlauben würde. Angekündigt wurde eine nationale Biomassestrategie, bisher liegen aber nur Eckpunkte vor. Entsprechende Regelungen und Strategien hätten u.a. dazu beitragen können, die intensiven politischen Diskussionen zum Thema „Heizen mit Holz“ im vergangenen Jahr zu versachlichen und dadurch unnötige Verunsicherung und Verärgerung der Betreiber von Holzheizungen zu vermeiden.

Das Betreiben von Holz(pellet)-Heizungen verursacht einen deutlich höheren Kosten- und Arbeitsaufwand als der Betrieb von z.B. Gasheizungen oder Wärmepumpen. Zur Beheizung kleinerer Objekte wie Einfamilienhäuser sind Holz(pellet)-Heizungen daher m.E. ungeeignet.

Vorbemerkungen

2015 beschlossen meine Frau und ich den Neubau eines alters- und behindertengerechten Hauses – aus gegebenem Anlass, denn wir waren damals beide „Ende 50“, außerdem bin ich leider chronisch krank, und alters- und behindertengerechten Altbauten werden praktisch nicht angeboten. Also ließen wir ein neues Haus bauen. 2017 zogen wir ein.

Zu den vielen Entscheidungen, die wir zu treffen hatten, gehörte die Entscheidung über die Art der Heizung des Hauses. Wir wollten und wollen weder mit fossilen Brennstoffen heizen noch mit Strom, der ja größtenteils immer noch mit Hilfe fossiler oder nuklearer Brennstoffe erzeugt wird¹.

Außerdem wollten wir den Einsatz von Dämmstoffen auf Erdölbasis, die irgendwann einmal Sondermüll sein werden, möglichst weitgehend vermeiden. Da die Stadt Weimar für unser Grundstück ein Gebäude im „Bauhaustil“ ohne Dachüberstand vorschrieb, kamen Wände aus Holz, Stampflehm oder Stroh für uns nicht in Frage. Die Außenwände unseres Hauses bestehen deshalb „nur“ aus 36 cm dicken Poroton-Ziegeln. Mit Hilfe einer Holzpellet-Heizung ließen sich die Vorgaben bezüglich des Primärenergieverbrauchs auch für ein derartiges Haus mit zwar besonders dicken, aber ansonsten „ungedämmten“ Ziegelwänden problemlos einhalten. Ziemlich naiv glaubten wir außerdem, uns für ein erprobtes, ökologisch sinnvolles und preiswertes Heizsystem entschieden zu haben.

Unsere Entscheidung für den Einbau einer Holzpellet-Heizung war also vor allem ökologisch motiviert; der Einbau von Holzpellet-Heizungen wurden damals vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWE, bis Dezember 2021) ebenso empfohlen wie von Naturschutzverbänden. Wegen dieser Entscheidung will ich aber zumindest nicht bestraft werden z.B. durch finanzielle Benachteiligungen gegenüber den Benutzern von Erdgasheizungen.

Der folgende Bericht stellt zunächst einmal das Potential des Brennstoffes Holz(pellet), die Technik und besonders die für uns ziemlich überraschenden technischen Probleme von Holzpellet-Heizungen dar.

Außerdem befasst sich dieser Bericht mit der Wirtschaftlichkeit einer Holzpellet-Heizung und mit den uns völlig überraschenden ökonomischen Auswirkungen des Ukraine-Krieges.

¹ 2022 wurden immer noch 33 % des deutschen Stroms aus Kohle, 9,3 % aus Erdgas und 6,7 % nuklear erzeugt. Der Anteil der erneuerbaren Energiequellen lag dagegen bei nur 49,7 %.

Und schließlich befasst sich dieser Bericht auch mit den ökologischen und politischen Bewertungen von Holz(pellet)-Heizungen.

Potential

Nach Angaben des Umweltbundesamtes (UBA) werden für den deutschen Wärme- und Kältebedarf $1.155 \cdot 10^9$ kWh/a (100 %) benötigt. Aus erneuerbaren Energien werden 17,4 % dieses Bedarfs gedeckt; der wichtigste regenerative Energieträger ist dabei Holz, mit dessen Hilfe $130 \cdot 10^9$ kWh/a (11,3 %) Wärmeleistung erzeugt wird. [1]

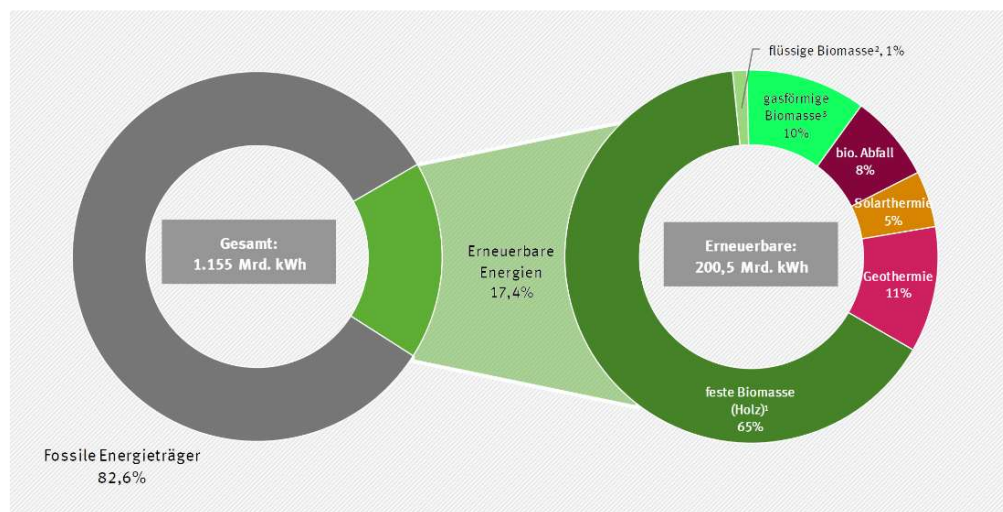
Nach Angaben des Deutschen Industrieholz- und Pellet-Verbandes e.V. (DEPV) fallen in den deutschen Sägewerken $7 \cdot 10^9$ kg/a Holzspäne und Hackschnitzel an, von denen $3 \cdot 10^9$ kg/a zu Pellets verarbeitet werden. Außerdem werden $0,3 \cdot 10^9$ kg/a „nicht sägefähiges Holz“ zu Pellets verarbeitet [2]. Durch die Verbrennung dieser Holzpellets wird also etwa $3,3 \cdot 10^9$ kg/a \times 5,2 kWh/kg \times 0,9 \approx $15 \cdot 10^9$ kWh/a (1,3 %) Wärmeleistung gewonnen.

Mit Hilfe von Pellets aus in Deutschland anfallenden Holzspänen, Hackschnitzel und „nicht sägefähigem Holz“ könnte also eine Wärmeleistung von maximal $7 \cdot 10^9$ kg/a \times 5,2 kWh/kg \times 0,9 \approx $33 \cdot 10^9$ kWh/a gewonnen werden. Dies entspräche 2,8 % der in Deutschland benötigten Wärmeleistung.

Holzpellet-Heizungen können also zwar einen nicht unwesentlichen Beitrag zur „Wärmewende“ liefern. Derartige Heizungen stellen aber zweifellos eine Nischenlösung dar. [3]

Endenergieverbrauch erneuerbarer Energien für Wärme und Kälte im Jahr 2022

Anteile in Prozent [%]



¹ inkl. Klärschlamm und Holzkohle

² inklusive Biodiesel für Land- und Forstwirtschaft, Baugewerbe und Militär

³ Biogas, Biomethan, Klärgas, Deponiegas

Quelle: Umweltbundesamt (UBA) auf Basis AGEE-Stat
Stand 02/2023

Abb. 1: Endenergieverbrauch für Wärme und Kälte im Jahr 2022 [1]

Zusätzlich zu den Sägewerkabfällen scheint momentan Abfallholz im Überfluss vorhanden zu sein. Wenn ich durch die deutschen Mittelgebirge fahre, dann sehe ich zahlreiche Waldstücke voller Bäume, die vom Borkenkäfer befallen, verdorrt und abgestorben sind. Dieser Anblick legt die Nutzung dieses Holzes für Heizzwecke nahe.

Zwar stammt dieses Holz zweifellos nicht aus nachhaltiger Forstwirtschaft. Da in den kommenden Jahrzehnten der Wald dem Klimawandel angepasst werden muss, wird derartiges Abfallholz zwar nicht zeitlich unbegrenzt, aber doch viele Jahre lang zur Verfügung stehen. Professor Andreas Bolte, Leiter

des Thünen-Instituts für Waldökologie², mahnt deshalb die Entwicklung einer Rahmenstrategie für die Holznutzung an:

„Professor Andreas Bolte ... kritisiert die fehlende Priorisierung bei der Nutzung der Ressource Holz. „Wir brauchen eine Rahmenstrategie für das Holz“, sagte Bolte. Zwar mangle es in Deutschland aufgrund zahlreicher beschädigter Wälder nicht an Holz. „Spätestens in den 2040er-Jahren werden wir einen Engpass haben“, prognostiziert er. „Und dann haben wir ein Problem.““ [4]

Angekündigt wurde für 2023 eine nationale Biomassestrategie, bis zum heutigen Tag (16.11.2023) liegen aber nur Eckpunkte vor.

Durch eine rechtzeitige Erarbeitung dieser Strategien hätten die intensiven politischen Diskussionen zum Thema „Heizen mit Holz“ im vergangenen Jahr versachlicht werden können. Unnötige Verunsicherung und Verärgerung der Betreiber von Holzheizungen wären zu vermeiden gewesen.

Technik

Holz als Brennstoff hat eine Reihe prinzipieller Vorteile:

- Holz aus nachhaltiger Forstwirtschaft ist ein regenerativer Brennstoff.
- Holzpellets aus „nicht sägefähigem Holz“ bzw. Reststoffen sind m.E. ökologisch unbedenklich.
- Die im Holz enthaltene Energie ist mit geringem Aufwand auch über lange Zeiträume speicherbar.
- Mit Holzheizungen lassen sich mit relativ geringem Aufwand auch hohe Vorlauftemperaturen erreichen, was ihren Einbau auch in Anlagen mit unterdimensionierten Heizkörpern ermöglicht.

Tab. 1: Energie bzw. Heizwert H_u^3 und Gewicht verschiedener Energieträger

	Heizöl	Rapsöl	Steinkohle	Holzpellets	Lithium-Ionen-Akku	Erdgas
Energie (kWh/m ³)	10.000	9.750	8.100	2.800	500	9,4
Energie (kWh/kg)	11,9	10,6	9	5,2	0,25	11,8
spez. Gewicht (kg/m ³)	840	920	900	540 ⁴	2.000	0,8

Prinzipielle Nachteile des Brennstoffes Holz sind:

- Ökologisch unbedenkliches Holz wie z.B. Holzpellets aus „nicht sägefähigem Holz“ bzw. Reststoffen fällt in nur begrenztem Umfang an.
- Auch bei der Holzverbrennung werden die unvermeidlichen Abgasschadstoffe wie z.B. Kohlendioxyd CO₂, Kohlenmonoxyd CO, Kohlenwasserstoffe H_mC_n, Stickoxyde NO_x, Lachgas N₂O, Methan CH₄, Ruß und Feinstaub emittiert. (Bei der Verbrennung von Holzpellets werden immerhin weniger Schadstoffe emittiert als bei der Verbrennung von Scheitholz. [3]).
- Der Transport von Holz ist aufwändiger als die Förderung flüssiger oder gasförmiger Brennstoffe.
- Bei der Förderung speziell von Holzpellets ist der Aufwand zwar relativ gering, allerdings entsteht hierbei Holzstaub.
- Bei der Holzverbrennung fällt Asche an.

² Johann Heinrich von Thünen-Institut, Bundesforschungsinstitut für Ländliche Räume, Wald und Fischerei, Braunschweig; Prof. Dr. Andreas Bolte, Institut für Waldökosysteme, Eberswalde

³ nur für die Brennstoffe

⁴ Übliche Speicher können maximal 90 % ihres Volumens nutzen.

Für die Pellet-Herstellung werden Holzreste zunächst getrocknet, zerkleinert und schließlich ohne chemische Zusätze unter hohem Druck durch eine Matrizze gepresst. Die wichtigsten Eigenschaften werden in der ISO 17225-2 beschrieben.

Üblicherweise werden die Pellets in Silowagen zum Kunden transportiert und dort mit Überdruck in die Speicher eingeblasen. Gleichzeitig wird das Luft-Holzstaub-Gemisch aus dem Speicher abgesaugt und über einen Filter in die Umgebung geblasen (Abb. 2).

Zu den Bestandteilen einer Pelletheizung gehört auch die Förderanlage. Unsere „vollautomatisierte“ Pelletheizung besitzt ein Vakuumsaugsystem: Über eine Saugturbine werden die Pellets angesaugt und kommen von vier Saugpunkten über Saugleitungen zum Kessel (Abb. 3 und Abb. 4).



Abb. 2: oben und mittig: Anlieferung der Pellets mittels Lkw und Einblasung in den Speicher über Leitungen; unten: Absaugung und Filterung des Luft-Holzstaub-Gemischs aus dem Speicher (Fotos: Spessert)



Abb. 3: Heizungskeller mit Ansauganlage, Tür zum Speicher und Heizkessel (Fotos: Spessert)



Abb. 4: links: leerer Speicher mit Ansaugsonden am Boden, Schrägboden sowie Einblas- und Absaugöffnung in der Rückwand; rechts: weitgehend leerer Speicher mit Holzstaubansammlungen im Bereich der Ansaugsonden (Fotos: Spessert)

Technische Probleme

Holzpellet-Heizungen laufen nicht „praktisch vollautomatisch“ wie z.B. eine Erdgasheizung. Meiner Erfahrung nach sollte die Heizung mindestens täglich kontrolliert werden. Im Abstand einiger Wochen ist der Aschekasten zu entleeren. Im „Normalfall“ jährlich ist die Heizung zu warten, und der Pellet-Speicher ist zu füllen. Und nach zwei bis drei Füllungen, also nach zwei oder drei Jahren, ist dieser Speicher zu reinigen, s.u.!

Durch die Reibung der Pellets untereinander, durch Zerbrechen und Zerbröseln bei der Herstellung, beim Einblasen in den Pellet-Speicher, beim Ansaugen aus dem Pellet-Speicher und dem Zurückblasen in den Pellet-Speicher entsteht Holzstaub (Abb. 4 und Abb. 5). Dieser Holzstaub kann die Anlage verstopfen und behindert außerdem das Nachrutschen der Pellets. Fast die Hälfte aller Heizungsausfälle soll auf den Holzstaubanfall zurückzuführen sein. Auch beim Betrieb unserer Anlage erwies sich der Holzstaubanfall als besonders problematisch.

Zur Verringerung des Staubanfalls wird die Verwendung möglichst kurzer Förderleitungen ohne Umlenkungen empfohlen. Durch eine gegenüber der Einblasleitung aufgehängte Prallschutzmatte kann das Zerbrechen oder Zerbröseln der Pellets und damit die Staubentstehung verringert werden. Schrägböden können verhindern, dass sich in den Ecken Staub dauerhaft ansammelt. Ein in die Rückluftleitung zwischen Saugturbine und Pellet-Speicher eingebauter Zyklon-Pellet-Entstauber kann Staubpartikel aus der Rückluft filtern und sie in einem Staubbehälter sammeln. Außerdem werden Pellets mit besonders geringem Staubanteil angeboten. Dadurch kann der Staubanteil im Fördersystem auf ein Minimum reduziert werden.



Abb. 5: mit Sieb händisch ausgesiebter Holzstaub (Foto: Spessert)

Trotzdem bilden sich im Speicher in Bodennähe und besonders im Bereich der Sonden immer (!) Zonen mit sehr hohem Staubanteil; die Ausdehnung dieser Zonen und ihr Staubanteil nehmen mit jeder Befüllung des Speichers zu (Abb. 4 und Abb. 5). Diese Bereiche mit sehr hohem Staubanteil müssen regelmäßig beseitigt werden, denn wird konzentrierter Staub angesaugt, dann verstopft er die Anlage.

Im Vergleich zu einer Wärmepumpen- und erst recht zu einer Erdgasheizung benötigt eine Pelletheizung deutlich mehr Raum; unsere Anlage benötigt zwei zusätzliche, über feuerfeste Türen betretbare Kellerräume mit etwa 10 m² Fläche, die mindestens 10.000 € Mehrkosten verursacht haben.

Die Beseitigung des Staubes im Pellet-Speicher ist sehr aufwändig und außerdem gefährlich:

- Die Luft in Pellet-Speichern ist immer sehr „staubig“. Auch Holzstaub reizt Augen, Nase, Atemwege und Lunge und gefährdet die Gesundheit.
- Zusätzlich besteht die Gefahr einer Holzstaubexplosion.
- Außerdem können sich besonders in Bodennähe giftige Gase wie Kohlenmonoxyd ansammeln.

Pellet-Speicher sollten also „eigentlich“ gar nicht betreten werden. Aber wie lässt sich ein Pellet-Speicher reinigen, ohne dass er betreten wird?

Wegen des erheblichen Aufwandes, den der Betrieb einer Holzpellet-Heizung erfordert, sind sie m.E. vor allem für „größere“ Wärmeverbraucher wie z.B. Wohnblocks geeignet und weniger z.B. für Einfamilienhäuser. Für besonders effektiv halte ich dagegen den Einsatz von Holz(pellet)-Heizungen zur Abdeckung von Wärmeverbrauchsspitzen z.B. als Teil von Nahwärmenetzen.

Wirtschaftlichkeit

Für unser Haus habe ich die jährlichen Gesamtkosten einer Holzpellet-, einer Wärmepumpen- und einer Erdgasheizung miteinander verglichen (Tab. 2a und 2b).

Wärmepumpe und Holzpellet-Heizung erfordern die höchsten Investitionskosten. Eine Holzpellet-Heizung verursacht außerdem die höchsten Wartungs- und Reparaturkosten, eine Wärmepumpe verbraucht teuren elektrischen Strom und verursacht dadurch trotz ihres hervorragenden Wirkungsgrades die höchsten Energiekosten.

In Summe ist ausgerechnet eine Erdgasheizung, also die „klimaschädlichste“ Heizung mit Abstand am billigsten, und zwar für niedrige und für 50 % höhere Energiekosten! Daran würden auch weitere Energiepreisanstiege nichts grundsätzlich ändern. Allerdings soll die Neuinstallation einer derartigen Erdgasheizung ohne Nutzung regenerativer Energien zukünftig⁵ nicht mehr zulässig sein.

⁵ Das genaue Datum ist im GEG festgelegt. Es hängt z.B. davon ab, wann die Kommune eine Wärmeplanung erstellt. Diese Wärmeplanung muss für Gebiete ab 100.000 Einwohner (wie z.B.

Tab. 2a: geschätzte Kosten einer Heizung mit Pellets, Wärmepumpe oder Erdgas für ein Einfamilienhaus in Weimar (Baujahr 2017, 180 m² Nutzfläche, 2 Bewohner, 19°C Innentemperatur)

	Holzpellets	Wärmepumpe	Erdgas (Brennwert)
<i>Investitionskosten [€]</i>	45.000	40.000	10.000
Energiekosten [€/a] ⁶	1.100	1.950	1.900
Wartungskosten [€/a]	1.000	400	200
Abschreibung und Kapitalkosten [€/a] ⁷	3.150	2.800	700
Gesamtkosten [€/a] ⁸	5.250	5.150	2.800

Tab. 2b: geschätzte Kosten für um 50 % erhöhte Energiekosten

	Holzpellets	Wärmepumpe	Erdgas (Brennwert)
<i>Investitionskosten [€]</i>	45.000	40.000	10.000
Brennstoffkosten [€/a] ⁹	1.650	2.950	2.850
Wartungskosten [€/a]	1.000	400	200
Abschreibung und Kapitalkosten [€/a]	3.150	2.800	700
Gesamtkosten [€/a]	5.800	6.150	3.750

Tab. 3: geschätzte Kosten einer Heizung mit Pellets, Wärmepumpe oder Erdgas sowie mit ergänzender Solarthermie für ein Einfamilienhaus in Würzburg (Baujahr 1975 bis 1980, 145 m² Nutzfläche, 4 Bewohner, 21°C Innentemperatur) [5]

	Holzpellets	Wärmepumpe	Erdgas (Brennwert)
<i>Investitionskosten [€]</i>	37.100 ¹⁰	35.500	33.000
Verbrauchskosten [€/a] ¹¹	1.850	3.950	3.450
Gesamtkosten [€/a] ¹²	4.400	6.950	5.150

Einen ähnlichen Vergleich hat die Stiftung Warentest durchgeführt (Tab. 3) [5]; sie verglich ebenfalls die jährlichen Gesamtkosten einer Holzpellet-, einer Wärmepumpen- und einer Erdgas-Heizung, aber in

Würzburg) bis 31.12.2027 erfolgen und für Gebiete mit 10.000-100.000 Einwohnern (wie z.B. Weimar) bis 31.12.2028.

⁶ 0,06 €/kWh für Holzpellets, 0,35 €/kWh für Wärmepumpenstrom, 0,12 €/kWh für Erdgas

⁷ 7 % der Investitionskosten

⁸ Brenn- und Betriebsstoffe, Wartung, Reparatur, Investitionsabschreibung, Verzinsung

⁹ 0,09 €/kWh für Holzpellets, 0,53 €/kWh für Wärmepumpenstrom, 0,18 €/kWh für Erdgas

¹⁰ Die Kosten für den Kellerraum des Pellet-Speichers wurden nicht berücksichtigt. Die Kosten für die Solarthermieanlage betragen 4.100 €.

¹¹ 0,06 €/kWh für Holzpellets, 0,35 €/kWh für Wärmepumpenstrom, 0,40 €/kWh für Haushaltsstrom, 0,12 €/kWh für Erdgas (plus Preissteigerungen und CO₂-Abgabe)

¹² Brenn- und Betriebsstoffe, Wartung, Reparatur, Investitionsabschreibung

allen Fällen ergänzt mit einer kleineren Solarthermieanlage¹³ und für ein kleineres Haus älteren Baujahrs. Dabei wurden allerdings die Kapitalkosten und insbesondere die Baukosten für den Raum, in dem die Pellets gespeichert werden, nicht berücksichtigt - die Stiftung Warentest nahm an, dass der Raum für die Pellet-Speicherung bereits vorhanden ist und keine zusätzlichen Kosten verursacht.

Auswirkungen des Überfalls auf die Ukraine

Bekanntlich überfielen am 24. Februar 2022 russische Truppen die Ukraine. Innerhalb weniger Tage wurde Energie extrem teuer. Meine Frau und ich glaubten aber, zumindest bei Auswahl unserer Heizung alles richtig gemacht zu haben: Wir heizten ja nicht mit russischem Öl, Gas oder Kohle, mit daraus erzeugter Elektrizität oder mit elektrischem Strom, der mittels russischer Brennelemente produziert worden war, sondern mit deutschen Holzpellets. Deshalb hielten wir uns (zumindest bezüglich der Verfügbarkeit des Energieträgers und der Heizkosten) für nicht betroffen. Diesbezüglich haben wir uns allerdings gewaltig geirrt!

Ähnlich wie in den Vorjahren lag 2021 der Pellet-Preis in Deutschland bei durchschnittlich knapp 250 €/t bzw. ca. 0,048 €/kWh. Dieser Preis stieg 2022 kontinuierlich an und erreichte im September 2022 seinen Maximalwert von über 750 €/t – während nicht einmal eines einzigen Jahres hatte sich der Preis also mehr als verdreifacht! Im September und nochmals im November 2022 war Energie aus Holzpellets teurer als Energie aus Heizöl.

Die Gründe für diesen Preissprung sind m.W. bisher nicht untersucht worden. Vermutlich wurde mit Pellets spekuliert. Außerdem ersetzten wohl Großverbraucher Gas, Öl oder Kohle durch Holzpellets. Eine weitere Ursache dürfte die Förderpolitik des BMWK bzw. Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK, ab Dezember 2021) gewesen sein, durch die die Anzahl der Pelletheizungen zwischen 2020 und 2022 um 30 % erhöht wurde. [7] Auch die Besitzer dieser neuen Heizungen mussten nun natürlich ihre Speicher mit Holzpellets füllen... Zeitweise waren Pellets entweder gar nicht mehr lieferbar oder nur noch zu „astronomischen Mondpreisen“. Inzwischen hat sich der Pellet-Preis wieder stabilisiert, allerdings auf hohem Niveau. 2023 schwankte der Pellet-Preis zwischen 330 €/t und 410 €/t (bzw. 0,063 €/kWh und 0,079 €/kWh). [6]

Nachdem die derzeitige Bundesregierung zunächst beabsichtigte, nur Nutzer von „leitungsgebundenen“ Energieträgern, also von Erdgas und von elektrischem Strom bei Preissprüngen finanziell zu unterstützen, entschloss sie sich auf Grund zahlreicher Proteste dann doch noch, diese Unterstützung auch auf Nutzer anderer Energieträger auszuweiten – tatsächlich gab es auch keinerlei nachvollziehbare Begründung dafür, dass die Nutzer von Flüssiggas, Erdöl und Kohle und erst recht von Holz grundsätzlich anders zu behandeln sein sollten als die von Erdgas oder Elektrizität.

Die „Härtefallhilfe für private Haushalte für nicht leitungsgebundene Energieträger“, die wir Anfang Mai 2023 beantragen konnten und die uns immerhin schon Mitte Juni ausgezahlt wurde, senkte den Preis der von uns Ende August 2022 gekauften Pellets von 685 €/t auf 521 €/t.

ökologische und politische Bewertungen

Die verschiedenen Gremien der Europäischen Union (EU), die deutsche Bundesregierung, die Oppositionsparteien im deutschen Bundestag, die Bundesländer, die Kommunen, die Wirtschafts- und Umweltverbände usw. beurteilten die Nachhaltigkeit von Holzpellet-Heizungen in den letzten Jahren immer wieder neu und kamen dabei zu höchst unterschiedlichen Ergebnissen. An dieser Stelle will ich nur einen sehr kleinen Teil der über das Thema „Heizen mit Holz“ entbrannten Diskussionen dokumentieren und mich dabei auf die „Bundesebene“ der BRD beschränken.

Ich beginne mit der Darstellung der Position der Wirtschafts- und Umweltverbände. 2009 waren sich der Naturschutzbund Deutschland (NABU) und der DEPV noch einig: „*Nach Auffassung von NABU und*

¹³ Auch die Neuinstallation einer Erdgasheizung mit nur einer kleineren Solarthermieanlage soll zukünftig nicht mehr zulässig sein, s.o..

DEPV ist eine Zunahme des Anteils von Holz am Energieverbrauch auch ohne einen Ausverkauf unserer Wälder möglich.“ [8]

2022 teilte der NABU dagegen mit: *„Der NABU hat seine Haltung zum Thema Holzverfeuerung auf der Basis neuer Erkenntnisse weiterentwickelt. ... Aus Sicht des NABU sollten Holzheizungen nur im Ausnahmefall eingebaut werden, wenn es keine andere Möglichkeit gibt. Denn Holz ist nur begrenzt verfügbar, und die zur Pelletherstellung genutzten Sägereste werden absehbar nicht ausreichen, wenn sich viele Haushalte für eine Holzheizung entscheiden.“ [9]* *„Bioenergie aus dem Wald ist mit Natur-, Umwelt- und Klimaschutz nicht vereinbar. Primärholz ist ein begrenzter und extrem wertvoller Rohstoff, welcher im Sinne der Kreislaufwirtschaft zunächst für die stoffliche Nutzung am Beginn einer Kaskadennutzung zur Verfügung stehen muss. Die energetische Holzbiomasse-Nutzung muss auf stofflich nicht mehr nutzbares Sekundär-Holz (Abfälle und Reststoffe aus der stofflichen Holzverarbeitung) beschränkt werden.“ [10]*

Die Deutsche Umwelthilfe (DUH) lehnt das Heizen mit Holz ebenfalls ab: *„Holzheizungen lehnt der Verein fast ausnahmslos ab: „Unsere Wälder abzuholzen und dann zu verheizen ist keine sinnvolle Lösung“, sagte (die DUH-Vertreterin Barbara, d.V.,) Metz. ... Es drohe jetzt der „unkontrollierte Einbau von Biomasseheizungen“. ... „Die Förderung für Holzheizungen soll zurückgefahren werden und möglichst bald enden“, forderte die Umwelt-Lobbyistin.“ [11]*

In der derzeitigen Bundesregierung sind für „(Heizen mit) Holz“ im Wesentlichen vier Ministerien zuständig, und zwar außer dem bereits erwähnten BMWV bzw. BMWK auch noch das Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (BMWSB), das Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) und das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Nukleare Sicherheit (BMUV) sowie das Umweltbundesamt (UBA).

BMWSB (Ministerin Klara Geywitz), BMEL (Minister Cem Özdemir), BMUV (Ministerin Steffi Lemke) sowie UBA standen und stehen dem Heizen mit Holz kritisch bis ablehnend gegenüber. Die beiden Ministerinnen und der Minister wollen vor allem die „stoffliche“ Verwendung von Holz insbesondere als Baumaterial priorisieren. Dazu sollen u.a. eine Initiative "Bauhaus Erde", eine „Charta Holz 2.0“ und eine „Holzbauinitiative der Bundesregierung“ dienen. Allerdings erwähnt Herr Özdemir zumindest auch eine mögliche energetische Verwendung von Holz [12], und Frau Geywitz will immerhin „Mutti und Vati“ den „romantischen Abend“ am Kaminofen nicht verbieten [4].

Dagegen werden Pelletheizungen durch das BMWV bzw. BMWK (Minister Robert Habeck) gefördert; der Umfang der vorher zeitweise extrem großzügigen Förderung ist allerdings seit 2022 deutlich verringert worden. Im Unterschied zu dieser Praxis sollten aber im ersten, im Frühjahr 2023 bekannt gewordenen Entwurf des Gebäudeenergiegesetz (GEG) Pelletheizungen für Neubauten schon ab 2024 nicht nur nicht mehr gefördert, sondern sogar grundsätzlich verboten werden. Nach Protesten von SPD, FDP und Teilen von (insbesondere den bayrischen) B90/GRÜNEN änderte aber die derzeitige „Ampelkoalition“¹⁴ ihre Pläne. Inzwischen wurde (gegen den entschiedenen Widerstand der Umweltverbände) beschlossen, dass Holz grundsätzlich ein nachhaltiger Brennstoff sei und deshalb Holzheizungen weiterhin auch in Neubauten installiert werden dürfen.

Meiner Meinung nach ist das Verheizen von Holzabfällen und Abfallholz z.Zt. durchaus ökologisch sinnvoll, und zwar so lange, wie nur dadurch die Verbrennung fossiler Energieträger verringert werden kann, weil regenerativ erzeugte Elektrizität noch nicht ausreichend zur Verfügung steht. Eine weitere Förderung von Holzheizungen erscheint mir aber nicht sinnvoll wegen der nur begrenzt verfügbaren Abfälle und Reststoffe.

Auch aus meiner Sicht ökologisch völlig undiskutabel und grundsätzlich abzulehnen sind dagegen Pläne, umgerüstete ehemalige Kohlekraftwerke zukünftig mit Hilfe aus Übersee importierter Holzpellets zu betreiben. [13]

Die im GEG geforderten Umrüstungen der Heizungsanlagen werden ohne finanzielle Unterstützung viele Menschen überfordern. Beim Bekanntwerden des ersten Entwurfs des GEG schien es für eine

¹⁴ Koalition von SPD, B90/GRÜNE und FDP auf Bundesebene unter Bundeskanzler Olaf Scholz

derartige Unterstützung aber noch keinerlei Planung zu geben. Inzwischen hat das BMWK auch diesbezüglich „nachgebessert“. Ob die derzeitigen Vorstellungen so oder modifiziert tatsächlich realisiert werden können, bleibt vorerst abzuwarten.

Der „Zickzack-Kurs“ der Ampelkoalition bei der „Wärmewende“, aber z.B. auch bei der „Verkehrswende“ hat leider dazu beigetragen, das Vertrauen der Bevölkerung in die Politik zu verringern. Dieser Vertrauensverlust beeinflusst Wahlergebnisse und hat dadurch politische Konsequenzen.

Prof. Dr. Peter Neumann¹⁵ hat sich in einem Interview mit dem SPIEGEL wie folgt geäußert: *„Wenn man sich das Problem des Klimawandels anschaut, kann es objektiv nicht schnell genug gehen. Auf der anderen Seite muss man die Leute mitnehmen, wenn Politik erfolgreich sein soll. Das ist auch ein Problem der Kommunikation. Man kann den Leuten nicht sagen, ihr müsst eine neue Heizung für zigtausend Euro kaufen, ohne dass man einen fertigen Plan hat, wie man denen hilft, die das nicht finanzieren können.“* ... *„Man muss auch alte weiße Männer in Ostdeutschland mitnehmen, die sich sorgen, wie lange sie noch ihr Benzinerauto fahren dürfen.“* [14]

abschließende Bemerkungen

Der Mensch ist das einzige Lebewesen, das mit Feuer umgehen kann – m.E. unterscheidet den Menschen vom Tier objektiv eigentlich nur diese Fähigkeit der Beherrschung des Feuers. Seit Millionen von Jahren versammeln sich Menschen am Feuer. Die Nutzung des Feuers ist ein uraltes Kulturgut. Die Bedeutung des Feuers für die Entwicklung der Menschheit kann gar nicht überschätzt werden!



Abb. 6: Feuer im Kaminofen (Foto: Spessert)

Zusätzlich zu unserer Holzpellet-Heizung besitzen und benutzen meine Frau und ich gelegentlich auch noch einen Kaminofen und lassen sich von den Flammen faszinieren. (Dabei beachten wir selbstverständlich die Ratschläge des UBA zum emissionsarmen Heizen. [15])

Die Faszination der Flammen war allerdings nicht der einzige Grund für den Einbau eines zusätzlichen Kaminofens. Denn seine Technik ist extrem robust. Ein Kaminofen ist auch dann noch betriebsbereit, wenn etwa auf Grund von Katastrophen z.B. längere Zeit der elektrische Strom ausfällt, so dass u.a.

¹⁵ Prof. Dr. Peter R. Neumann, Professor für Sicherheitsstudien am Londoner King's College, „Radikalisierungsforscher“ und Politikberater

sämtliche anderen Heizanlagen nicht mehr funktionieren. (Auch eine Holzpellet-Heizung benötigt selbstverständlich Elektrizität.) Mit einem Kaminofen lässt sich auch in diesem Fall noch zumindest ein Teil des Hauses heizen, ein Einfrieren des Hauses (und damit ein Platzen aller mit Wasser gefüllter Leitungen) verhindern und notfalls auch noch Wasser abkochen und damit trinkbar machen.

Effektiv sind Kaminöfen außerdem zur Abdeckung von Wärmeverbrauchsspitzen. So unterstützen unsere Nachbarn mit Hilfe eines Kaminofens ihre Wärmepumpe – besonders in kalten Nächten, in denen ihre PV-Anlage nun mal keine Elektrizität liefern kann und gleichzeitig der Wirkungsgrad ihrer Wärmepumpe sehr klein wird.

Literaturverzeichnis

- [1] <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/erneuerbare-energien/erneuerbare-energien-in-zahlen#wuerme> aufgerufen am 5.6.2023
- [2] <https://www.depi.de/pelletproduktion> aufgerufen am 19.6.2023
- [3] Eine Chance für die Heiz-Pellets? Thüringer Landeszeitung 31.5.2023
- [4] Geywitz gegen Heizen mit Holz, außer für „Mutti und Vati“ beim „romantischen Abend“; WELT, aufgerufen am 7.7.2023
- [5] Schönheizwettbewerb, Zeitschrift „test 6/2023“ (Juni 2023)
- [6] <https://depv.de/p/DEPV-Pelletpreis/Wirtschaftlichkeit> aufgerufen am 16.11.2023
- [7] <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/171886/umfrage/anzahl-der-pelletheizungen-in-deutschland/> 20.6.2023
- [8] Leitlinien für eine nachhaltige Energieholzgewinnung im Wald; Gemeinsames Positionspapier des Deutschen Energie-Pellet-Verbands (DEPV) e.V. und des Naturschutzbund Deutschland (NABU) e.V., 12. Mai 2009, https://www.nabu.de/imperia/md/content/nabude/wald/leitlinien_nabu-depv.pdf, aufgerufen am 16.11.2023
- [9] <https://www.nabu.de/umwelt-und-ressourcen/energie/energieeffizienz-und-gebaeudesanierung/33183.html> aufgerufen am 22.6.2023]
- [10] https://www.nabu.de/imperia/md/content/nabude/biooekonomie/220706_standpunkt_holzbiomasse_pdf.pdf
- [11] Die Umwelthilfe verreit das Heizungsgesetz im Bundestag – auf Einladung der Grünen; WELT aufgerufen am 21.6.2023
- [12] Was wir brauchen, ist eine gesunde Balance von Biodiversität, Klimaschutz und Rohstoffnutzung; Grußwort von Bundesminister Cem Özdemir zum neuen Jahr, Holz-Zentralblatt, 9.1.2023
- [13] https://www.duh.de/fileadmin/user_upload/download/Projektinformation/Energiewende/Infopapier_Kraftwerksumruestung_Wilhelmshaven.pdf; Stand: März 2023, Impressum: © 2023, NABU Bundesverband, 1. Auflage 03/2023
- [14] Rechtsextremismus ist auf dem Vormarsch; Interview mit Peter R. Neumann, DER SPIEGEL Nr. 37/9.9.2023
- [15] https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/uba_rg_heizen_mit_holz.pdf, aufgerufen am 24. Juli 2023

Temperaturkataster zur Analyse der Realisierbarkeit des NT-Ready-Standards im Wohngebäudebestand

Salaymeh A.^{1,2*}, Mehring T.¹, Kleff F.¹, Peters I.², Bertram E.¹, Föste S.¹, Holler S.¹

¹ Hochschule für angewandte Wissenschaft und Kunst Hildesheim/Holzminde/Göttingen

² HafenCity Universität Hamburg, Henning-Voscherau-Platz 1, 20457 Hamburg

Abstract

In der Praxis ist längst nicht jedes Gebäude für die Integration erneuerbarer Energien vorbereitet. Oft sind es die hohen erforderlichen Temperaturen im Heizungssystem, die den Wechsel blockieren. Diese Studie beschäftigt sich mit der Analyse der minimal erforderlichen Vorlauftemperaturen für unterschiedliche Effizienz Zustände des Gebäudebestands. Unsere ersten Ergebnisse für Niedersachsen ergaben, dass zurzeit etwa 15% der niedersächsischen Wohngebäude bereit für eine Niedertemperatur-Wärmeversorgung von $\leq 55^\circ\text{C}$ sind oder durch wenige gezielte Maßnahmen der Wärmedämmung u./o. Verbesserung der Heizverteilung Niedertemperatur-Ready (NT-Ready) werden. Entwickeln sich die Sanierungsraten bis zum Jahr 2045 weiterhin wie in der Vergangenheit, erhöht sich dieser Anteil auf 65%. Werden alle Gebäude nach dem GEG Standard vollständig saniert (alle Bauteile), kann von einem Niedertemperatur-Ready Anteil am Wohngebäudebestand von 78% ausgegangen werden. Erfolgen zukünftige Gebäudesanierungen bis zum Jahr 2045 nach dem Passivhaus-Standard, lässt sich dieser Anteil auf 96% erhöhen. Durch eine vollständige Sanierung nach dem Passivhaus-Standard erreicht jedes Haus die Niedertemperatur-Ready Bedingungen.

1. Einleitung

Mit Änderung des Klimaschutzgesetzes im Juni 2021 hat sich Deutschland das Ziel der Treibhausgasneutralität bis zum Jahr 2045 gesetzt. Die Wärmenachfrage stellt den zentralen Treiber des Endenergieverbrauchs in Deutschland in Form von Raumwärme (28,0%), Warmwasser (5,5%) und Prozesswärme (22,6%) dar [1, 2]. Der erneuerbare Anteil stagniert seit zehn Jahren auf niedrigem Niveau zwischen 14,0% und 16,5% [1–3]. Somit erfordert die Realisierung einer treibhausgasneutralen Energieversorgung einen fundamentalen Infrastruktur- und Technologiewandel zur nachhaltigen Wärmebereitstellung im Wärmesektor [4, 5]. Gleichzeitig setzen aktuelle Studien die energetische Modernisierung von Bestandsgebäuden als eine der wichtigsten Voraussetzungen zur Erreichung dieses Ziels voraus. Zielwerte zur Wärmebedarfsreduktion bewegen sich in den meisten Szenarien im Bereich von 30% bis 50% [6–8].

Die Einsetzbarkeit erneuerbarer Energieerzeuger und der Grad der energetischen Modernisierung beeinflussen sich gegenseitig, insbesondere in Bestandsgebäuden. Je weiter der Wärmebedarf durch nachträgliche Dämmmaßnahmen reduziert wird, desto weiter reduzieren sich die für Heizflächen erforderlichen Systemtemperaturen in Gebäuden. Gleichzeitig können durch sinkende Systemtemperaturen verschiedene erneuerbare Technologien für eine nachhaltige Energieversorgung effizienter und effektiver (Wärmepumpen, Solarthermie-Anlagen, Wärmenetze etc.) integriert und betrieben werden. Die höhere Effizienz ergibt sich durch die höheren Wirkungsgrade und Arbeitszahlen der erneuerbaren Erzeuger sowie die geringeren Verteilverluste. Die Effektivität ergibt sich dadurch, dass lokal verfügbare und meist technisch begrenzte EE-Potenziale für eine größere Anzahl von Gebäuden zur Verfügung stehen.

*Korrespondierender Autor.

Rudolf-Diesel-Straße 12, 37075 Göttingen

E-Mail: abdulraheem.salaymeh@hawk.de; Tel.: +495515032154

1.1 Konzept der Temperaturkataster und Unterschied zu Wärmekatastern

In den letzten Jahren hat sich die Nutzung von Wärmekatastern als wichtiges Instrument zur Wärmeplanung in Deutschland etabliert (siehe z.B. [Wärmekataster Saarland](#), [Hamburg](#), [Nordrhein-Westfalen](#), [Baden-Württemberg](#)). Ein Wärmekataster bildet u. a. den Wärmebedarf von Gebäuden kartografisch auf verschiedenen räumlichen Ebenen (gebäudescharf, Baublock, Quartier etc.) ab. Hierbei wird der Wärmebedarf auf Basis geometrischer (Fläche, Höhe), technischer (z. B. spezifische Wärmebedarfskennwerte) und statistischer (z. B. Baujahr, Sanierung, Nutzung) Daten für den Gebäudebestand abgeschätzt. Unterschiedlich große Gebäude identischen Energiestandards weisen in Wärmekatastern große Unterschiede im ermittelten Wärmebedarf auf. Dieses Problem hebt sich insbesondere dadurch hervor, dass einzelne Gebäude in den Gebäudemodellen der Landesvermessungsämter sehr oft als mehrteilige Objekte mit getrennten Flächen abgebildet sind. Somit kann ein Wärmekataster allein nur mit großen Unsicherheiten einen ersten Indikator auf die Energieeffizienz bzw. die erforderliche Vorlauftemperatur in Bestandsgebäuden bilden.

Darauf aufbauend schlagen wir im Rahmen des Forschungsprojekts „Transformationsstrategien für Wohngebäude und -quartiere mit modellbasierten Wärme- und Temperaturkatastern (TraWoKat)“ die Definition eines sogenannten **Temperaturkatasters** als Indikator über die minimal erforderlichen Vorlauftemperaturen und dementsprechend die realisierbaren bzw. passenden Heizungssysteme im Gebäudebestand vor. Die kartografische Abbildung der Temperaturkataster ermöglicht in Zusammenspiel mit Wärmekatastern die Zuweisung von energetischen Maßnahmenpaketen der Gebäudetechnik und der Gebäudehülle sowie passenden Wärmeversorgungskonzepten in Quartieren (z.B. dezentrale Wärmepumpensysteme, Niedertemperatur-Wärmenetze, kalte Wärmenetze) räumlich hochaufgelöst und in zeitlicher Rangfolge.

Abb. 1 veranschaulicht beispielhaft den Unterschied zwischen einem Wärmekataster (Abb. 1 links) und einem Temperaturkataster (Abb. 1 rechts) für den gleichen Kartenausschnitt, wobei erkennbar ist, dass Gebäude der gleichen Farbskalierung im Wärmekataster meistens unterschiedlich minimal erforderliche Vorlauftemperaturen im Temperaturkataster aufweisen können. Basierend auf der Kenntnis über den Energiestandard der in Abb. 1 demonstrierten Gebäude, werden mithilfe des Temperaturkatasters die heutzutage verfügbaren Heizungssysteme dem Gebäudebestand zugewiesen. Die Bandbreite reicht von Niedertemperatursystemen mit Fußbodenheizung (blau) bis zu konventionellen Heizungssystemen (rot), wobei die Temperaturgrenzen sowie Heizungssysteme zunächst zum zwecks der Veranschaulichung grob definiert sind.

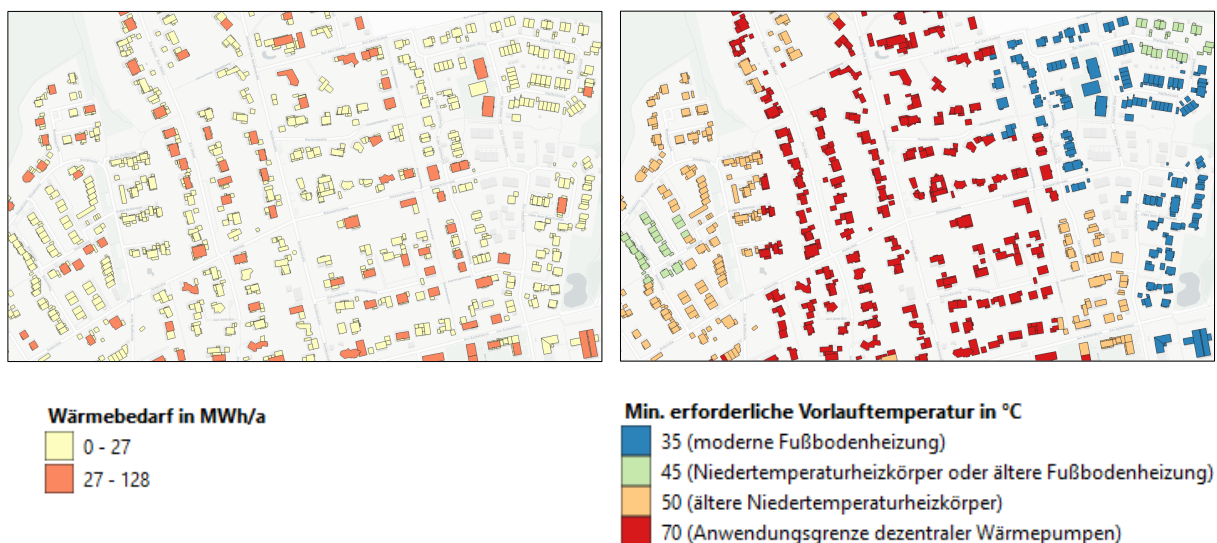


Abb. 1: Vergleich zwischen Wärmekataster (links) und einem beispielhaften Temperaturkataster (rechts) für den gleichen Kartenausschnitt

1.2 NT-Ready (Niedertemperatur-Ready) als geprüftes Temperaturniveau

Die Bundesförderung für effiziente Gebäude (BEG) schreibt in den Technischen Mindestanforderungen (TMA) an die Anlagentechnik eines Effizienzhauses den Standard Niedertemperatur-Ready (NT-ready) vor [9]. Laut dem Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg (ifeu) sind Gebäude „NT-ready, wenn Maßnahmen der Wärmedämmung, Heizkreisoptimierung oder effizienten Warmwasserbereitung soweit vollzogen sind, dass mit einer maximalen Heizwasser-Vorlauftemperatur von 55°C die von den Raumnutzern geforderte Raumtemperatur gewährleistet ist“ [10]. Hierbei wurde der Grenzwert von 55°C auf der Basis festgelegt, dass erneuerbare Anlagen in der überwiegenden Mehrzahl der Gebäude in einem technisch und wirtschaftlich zufriedenstellenden Bereich betrieben werden. Niedrigere Temperaturen sind natürlich erreichbar und auch im Sinne einer effizienten Anlage gewünscht, jedoch verlangen insbesondere Trinkwarmwasseranlagen aus hygienischen Gründen eine entsprechend hohe Temperatur. Die gewählte 55°C Grenze soll einen unkomplizierten Weiterbetrieb der vorhandenen Trinkwarmwassersysteme sicherstellen. Die NT-Readiness soll eine eindeutige Aussage darüber sein, dass ein Gebäude den Mindeststandard erreicht hat, ab dem erneuerbare Wärme i.d.R. sinnvoll ist.

Darauf aufbauend werfen sich die folgenden Fragen auf:

- I. In welchem Ausmaß variieren die erforderlichen Vorlauftemperaturen je nach Effizienzstatus im Gebäudebestand?
- II. Wie kann der gegenwärtige Gebäudebestand hinsichtlich des NT-Ready-Standards bewertet werden und durch welche baulichen und anlagentechnischen Maßnahmen lässt sich dieser Standard zukünftig realisieren?
- III. Welche Muster zeichnen sich in Bezug auf die räumliche Verteilung der Vorlauftemperaturen im niedersächsischen Gebäudebestand ab, und welche Potenziale zur Reduzierung dieser Temperaturen lassen sich identifizieren?

2. Material und Methoden

In diesem Abschnitt erarbeiten wir Methoden zur Entwicklung von Wärme- und Temperaturkatastern sowie zur Bewertung der NT-Readiness im Gebäudebestand für fünf unterschiedliche Stadien der Gebäude-Energieeffizienz:

- (1) Zustand 2023 GEG: Sanierungszustand im Jahr 2023 basierend auf Fortschreibung des historischen Sanierungsgeschehens nach [11] (Modernisierungsfortschritt 39%) unter Einhaltung des GEG-Standards.
- (2) Zustand 2045 GEG: Sanierungszustand im Jahr 2045 basierend auf Fortschreibung des historischen Sanierungsgeschehens nach [11] (Modernisierungsfortschritt 73%) unter Einhaltung des GEG-Standards.
- (3) Vollsanierung GEG: Gebäude mit Baujahr bis 2010 sind unter Einhaltung des GEG-Standards vollständig saniert und weisen Kennwerte nach [12] auf.
- (4) Zustand 2045 Passivhaus: Sanierungszustand im Jahr 2045 basierend auf Fortschreibung des historischen Sanierungsgeschehens nach [1] (Modernisierungsfortschritt 73%) unter Einhaltung des Passivhaus-Standards.
- (5) Vollsanierung Passivhaus: Gebäude mit Baujahr bis 2010 sind unter Einhaltung des Passivhaus -Standards vollständig saniert und weisen Kennwerte nach [12] auf.

Hierfür sollen in erster Linie Informationen über Gebäudetypologien mit Kennwerten über Wärmebedarf, Systemtemperatur, Sanierung sowie Wetter- und Geodaten korreliert werden. Es bieten sich hierfür verschiedene öffentlich verfügbare Datenquellen an, die sich hinsichtlich der Verfügbarkeit, Vollständigkeit, Informationsgehalt, Genauigkeit, Detaillierungsgrad etc. stark unterscheiden. Wir verwenden in unseren Methoden die in Tab. 1 aufgeführten Datenquellen in Anlehnung an die folgenden Kriterien:

- Daten sind vollständig und für alle Standorte in Deutschland frei verfügbar und anwendbar.
- Daten sind systematisch erhoben und aufbereitet, sodass keine Informationslücken oder

- uneinheitliche Bezugsgrößen existieren.
- Daten wurden bereits einem Qualitätssicherungsverfahren unterzogen.

Tab. 1: Datengrundlage zur Entwicklung von Wärme- und Temperaturkatastern

Quelle	Informationsgehalt
Zensus – GWZ [13]	Gebäudemerkmale: Wohnfläche, Gebäudetyp, Baujahr, Heizungsart
IWU [12]	Wärmebedarfskennzahlen, Wohngebäudetypologie
IWU [11]	Sanierungskennzahlen
ifeu [10], Beuth [14]	Temperaturkennzahlen
DWD [15]	Klimafaktoren
BKG [16]	Gemeindegrenzen, GeoGitter Inspire

2.1 Datenaufbereitung

Die Gebäude- und Wohnungszählung (GWZ) ist die umfassendste Datenquelle mit energierelevanten Informationen über den Gebäudebestand in Deutschland. Hierbei wurden insgesamt 13 Erhebungsmerkmale (Heiz- und Gebäudetyp, Baujahr, Wohnfläche etc.) sowie eine Reihe von Hilfsmerkmalen erfasst. Die Informationen einzelner Gebäude wurden in der GWZ aus Datenschutzgründen auf Hektar-Ebene aggregiert, einem geografischen Punkt zugeordnet (Abb. 2a) und mit entsprechenden geografischen Koordinaten versehen. Die in einem Punkt hinterlegten Informationen beziehen sich auf alle Gebäude innerhalb eines nordöstlich (NO) angrenzenden Hektar-Rechtecks „GeoGitter Inspire“ in Lambert-Projektion (Abb. 2b). Besitzen die Gebäude, die in einer Gitterzelle liegen, unterschiedliche Merkmale (z.B. unterschiedliche Baujahre), so wurden in der GWZ für dieses Gebiet mehrere Gitterzellen erzeugt und mit den entsprechenden Merkmalen versehen.

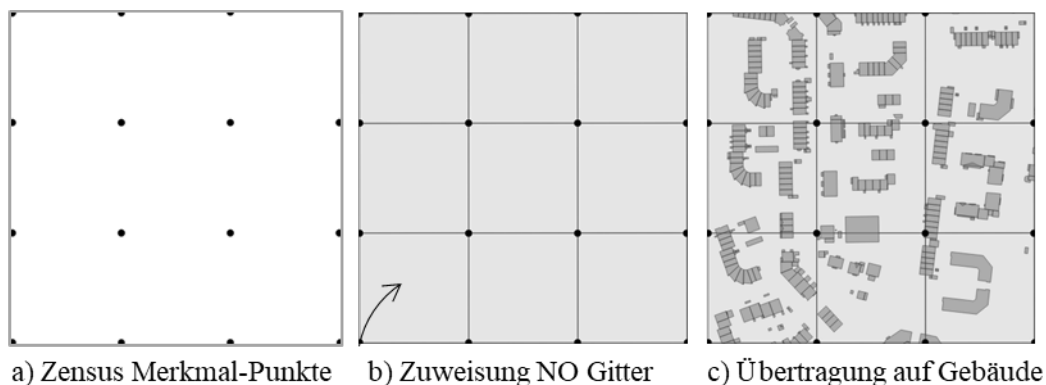


Abb. 2: Geografische Abbildung und Zuweisung der GWZ Merkmale

Für den letztgenannten Fall von mehreren aufeinander überlagerten Gitterzellen führen wir einen Daten-Aufbereitungsprozess (siehe Abb. 3), um verfügbare Informationen für die entsprechenden Standorte zusammenzufassen bzw. für die Übertragung auf die vom Gitter umfassten Gebäude bereitzustellen (Abb. 2c). Wie Abb. 3 illustriert, startet der Daten-Aufbereitungsprozess mit der Analyse von ca. 51 Millionen Gebäudemerkmalen der GWZ. Für die GWZ-Punkte identischer Koordinaten jedoch unterschiedlicher Merkmale (z.B. unterschiedliche Wohnflächen und Baujahre) erfolgt der Prozess:

- Summe aller Wohnflächen.
- Max. vorkommender Gebäudetyp.

- Durchschnitt aller Baujahre.
- Prozentuale Einteilung Heizsysteme.

Ca. 60% der Merkmale enthalten Informationen über Eigentumsverhältnisse, Belegung oder Anzahl der Räume in den Wohnungen, die für unsere Analyse weniger relevant sind und daher nicht berücksichtigt werden (im Workflow als „Andere“ bezeichnet).

Der GWZ unterteilt die Wärmeversorgungsstruktur in fünf unterschiedliche Heizsysteme ein (siehe den grünen Flow in Abb. 3). Durch die Merkmale „GEBTYPGROESSE“ und „BAUJAHR_MZ“ wird in GWZ zwischen den verschiedenen Gebäudetypen und –baujahren des deutschen Wohngebäudebestands unterschieden (jeweils orangener und roter Flow in Abb. 3). Durch das Merkmal „WOHNFLAECHE_10S“ wird in etwa die beheizte Fläche des Gebäudes wiedergegeben. Die „10S“ besagt hierbei, dass die Wohnflächen in 10m² Intervallen angegeben werden (siehe den blauen Flow in Abb. 3). Im Schritt der Datenaufbereitung bilden wir Durchschnittswerte für die jeweiligen Intervalle. Somit werden alle notwendigen typologischen Gebäude-Informationen für Erarbeitung von Wärme- und Temperaturkatastern in den folgenden Abschnitten aufbereitet.

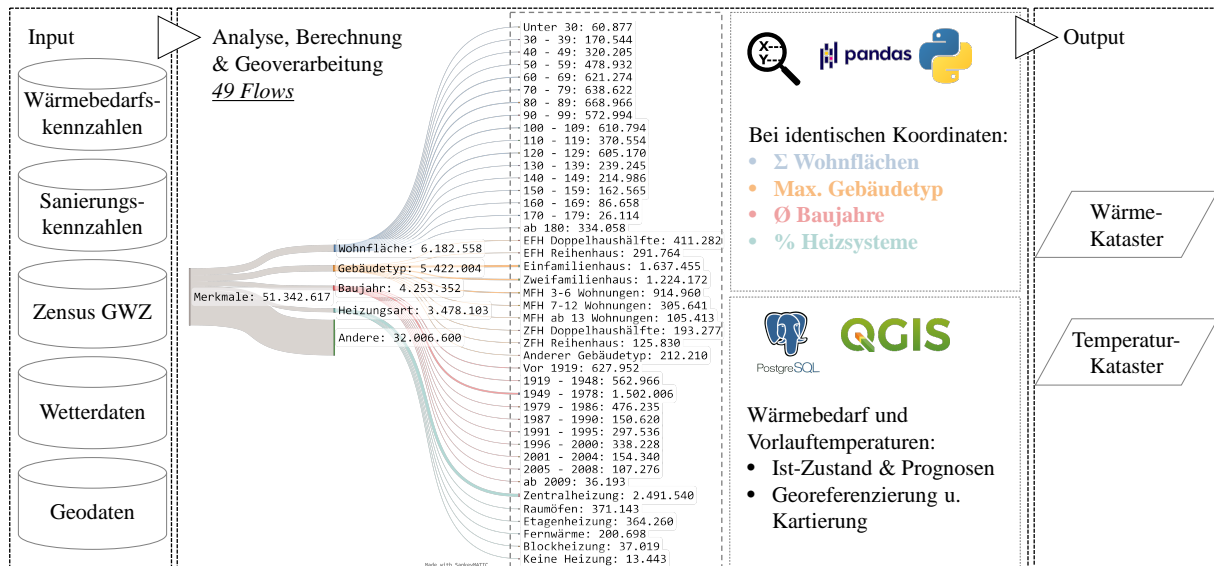


Abb. 3: Workflow zur Entwicklung von Wärme- und Temperaturkatastern

2.2 Wärmekataster

Für jede Kombination Gebäudetyp und Baujahr wurden in [17] basierend auf [11, 12] spezifische Wärmebedarfswerte (kWh/(m²·a)) für unterschiedliche Stützjahre errechnet, die den bereits erreichten oder erwarteten Sanierungszustand berücksichtigen. Diese beziehen sich auf die klimatischen Bedingungen des Referenzklimas von Deutschland (Standort Potsdam), sodass die Anwendung dieser Werte für andere Standorte eine Anpassung erfordert. Hierfür bieten sich die sogenannten Klimafaktoren f_K an, die als Quotienten aus den mittleren Jahresgradtagen der Referenzstation Potsdam und den Jahresgradtagen des jeweiligen Untersuchungsortes berechnet werden [15]. Darauf aufbauend lässt sich der jährliche Gebäudewärmebedarf (in kWh/a) basierend auf Gl.(1) einschätzen:

$$Q_j = \sum_{i=1}^n \left(\frac{q_{RW,i,j}}{f_{K,i,j}} + q_{WW,i,j} \right) \cdot A_i \quad (1)$$

Darin Q_j der Wärmebedarf im Jahr j in (kWh/a), $q_{RW,i,j}$ der spezifische Raumwärmebedarf in (kWh/(m²·a)), $f_{K,i,j}$ der Klimafaktor am Standort der Gitterzelle i , $q_{i,WW}$ der spezifische Warmwasserbedarf in (kWh/(m²·a)) und A_i die beheizte Wohnfläche sind.

Die Gebäudewärmebedarfe können für eine beliebige Anzahl n an GWZ Gitterzellen für die in

Abschnitt 2.1 genannten Effizienzstufen ermittelt und anschließend für bestimmte Gebiete (Stadtteil, Stadt etc.) aggregiert werden. Die kartografische Abbildung der ermittelten Wärmebedarfe bildet ein Wärmekataster.

2.3 Temperaturkataster

Basierend auf der sogenannten Heizkörpergleichung lässt sich die minimal erforderliche Vorlauftemperatur in Gebäuden für berechnete Heizkörperleistungen abschätzen. Durch vereinfachte Annahme von 2.000 Volllaststunden für alle Errichtungs- und Sanierungszustände wurde in [14] der Einfluss der sanierungsbedingten Wärmebedarfsreduktion auf die minimal erforderliche Vorlauftemperatur abgeschätzt. Wie Abb. 4 darstellt, wurden hierbei zwei symptomatische Fälle („Urzustände“ Erbauungszustand des Gebäudes) zu Grunde gelegt, wobei Heizkörper üblicherweise für Temperaturspreizungen von 70/55/20 (Vorlauf, Rücklauf, Raumtemperatur) für neuere Gebäude und mit Temperaturen von 90/70/20 für ältere Gebäude ausgelegt wurden [14]. Jochum *et al.* [14] argumentieren, dass aufgrund der überschaubaren Differenzen der Werte beider Kurven (<10%) es legitim erscheint mit einem Mittelwert zu rechnen. Darauf aufbauend lässt sich vereinfachend mithilfe einer Regressionsgeraden (gelbbraune Linie in Abb. 4) die folgende Regressionsgleichung zur Ermittlung der erforderlichen Vorlauftemperatur T_j bei bestimmten Heizwärmebedarfen ableiten:

$$T_j = 0,2672 \cdot \frac{q_{RW,i,j}}{f_{K,i,j}} + 35,468 \quad (2)$$

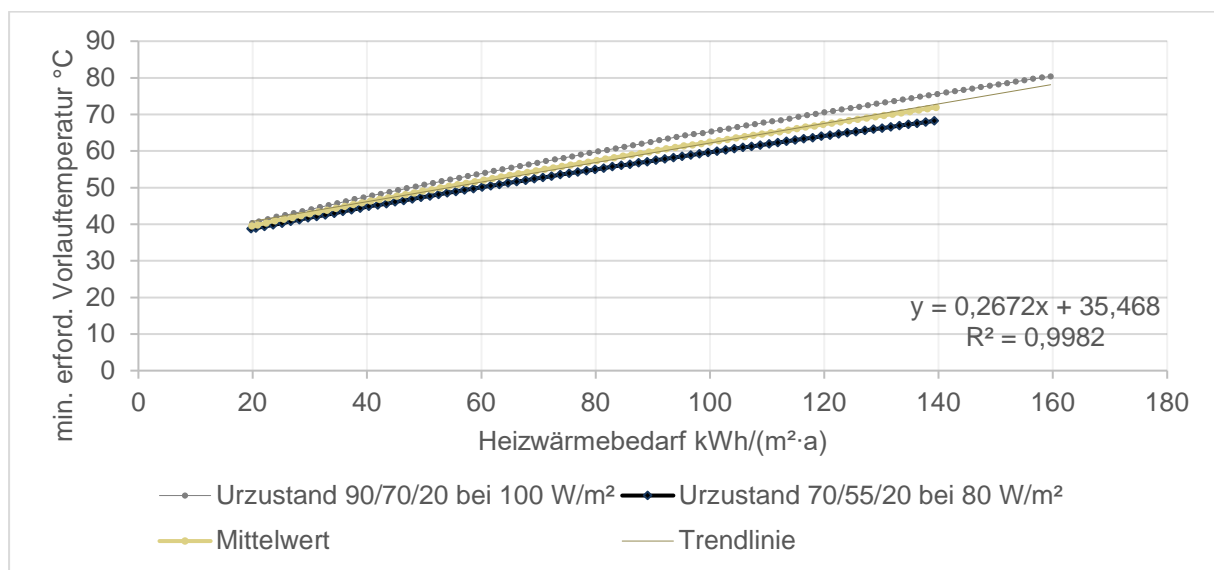


Abb. 4: Abhängigkeit der minimal erforderlichen Vorlauftemperatur vom Heizwärmebedarf

Die in Abb. 4 resultierende Reduzierung der Vorlauftemperatur ergibt sich lediglich durch Dämmmaßnahmen der Gebäudehülle entsprechend den in Kapitel 2 definierten Effizienzstadien. Darüber hinaus lässt sich in Anlehnung an [10] eine weitere Reduzierung der Vorlauftemperatur um durchschnittlich 5K erzielen, wenn die ungünstigsten Heizkörper im Gebäude ausgetauscht werden.

3. Erste Ergebnisse

Wie Abb. 5 zeigt, ergab unsere erste Analyse für Niedersachsen, dass zurzeit etwa 15% der niedersächsischen Wohngebäude bereits NT-Ready sind oder durch wenige gezielte Maßnahmen der Wärmedämmung u./o. Verbesserung der Heizverteilung NT-Ready werden (siehe Abschnitt 2.3). Entwickeln sich die Sanierungsraten bis zum Jahr 2045 weiterhin wie in der Vergangenheit, erhöht sich der NT-Ready Anteil auf 65%. Werden alle Gebäude nach dem GEG Standard vollständig saniert (alle Bauteile), kann von einem NT-Ready Anteil am Wohngebäudebestand von 78% ausgegangen werden. Erfolgen zukünftige Gebäudesanierungen bis zum Jahr 2045 nach dem Passivhaus-Standard, erhöht sich der Anteil der NT-Ready Gebäude auf 96%. Durch eine vollständige Sanierung

nach dem Passivhaus-Standard ist jedes Haus NT-Ready. Die Autoren sind jedoch der Auffassung, dass Szenarien der vollständigen Sanierung aller Gebäude in Niedersachsen auf Passivhausstandard sehr unwahrscheinlich sind und nur in Teilen realisiert werden könnten.

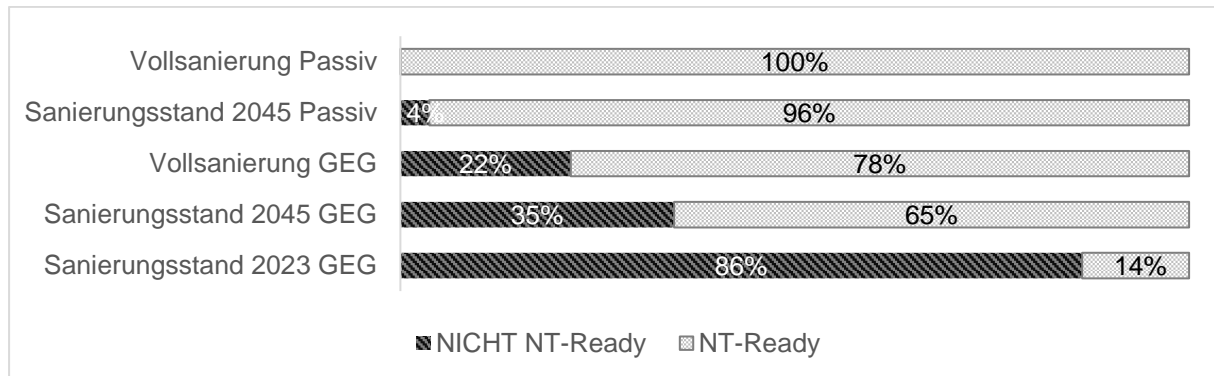


Abb. 5: NT-Readiness des niedersächsischen Wohngebäudebestands

Abb. 6 bildet die räumliche Verteilung der erforderlichen bzw. nach Sanierung realisierbaren Vorlauftemperaturen im niedersächsischen Wohngebäudebestand ab. Die folgenden Vorlauftemperaturen sind in den einzelnen Effizienzzuständen dominant:

- Temperaturen von über 60°C im Zustand 2023 GEG, von über 56°C im Zustand 2045 GEG und von über 54°C im Zustand Vollsanierung GEG.
- Temperaturen von über 44°C im Zustand 2045 Passivhaus und von über 41°C im Zustand Vollsanierung Passivhaus.

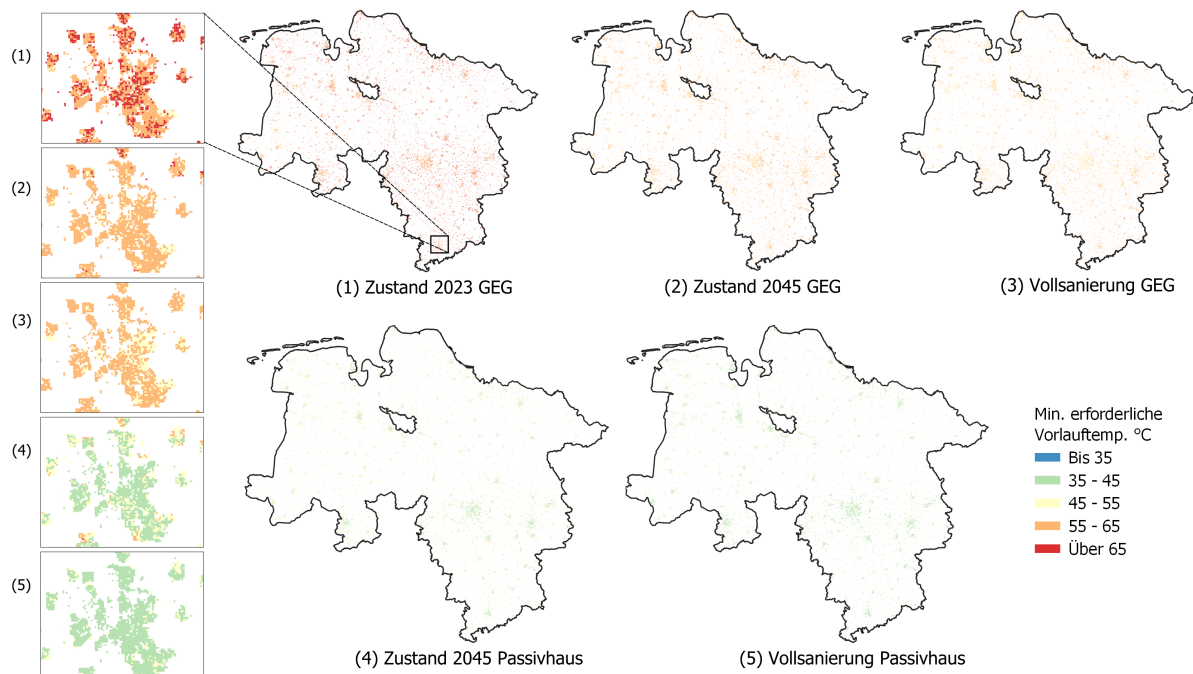


Abb. 6: Temperaturkataster des niedersächsischen Wohngebäudebestands für die Energieeffizienz-Zustände (1–5); Göttingen im Quadrat exemplarisch hervorgehoben

Diskussion

Der Terminus „Temperaturkataster“ wurde erstmals im Rahmen des Forschungsprojekts "Transformationsstrategien für Wohngebäude und -quartiere mit modellbasierten Wärme- und

Temperaturkatastern (TraWoKat)" definiert und auf deutsche Städte angewendet. Das Projekt startete im September 2023 und wird sich bis August 2026 unter aktiver Einbeziehung regionaler Praxispartner aus der Planung und Verwaltung von Wohngebäuden erstrecken. In dieser Studie wurden an einigen Stellen vereinfachte Annahmen getroffen, und ausschließlich Open Data wurde verwendet, um zunächst das Grundmodell zu entwickeln, zu testen sowie Schwachstellen zu identifizieren und zu fokussieren.

Dennoch zeigt sich an den Ergebnissen deutlich die technische Machbarkeit, bestehende Temperaturniveaus durch energetische Sanierung über den vollständigen Gebäudebestand zu reduzieren.

Förderhinweis

Diese Studie wurde im Rahmen des Forschungsprojekts „Transformationsstrategien für Wohngebäude und –quartiere mit modellbasierten Wärme- und Temperaturkatastern (TraWoKat)“ (Kennzeichen ZN4155) aus Mitteln des Programms „zukunft.niedersachsen“ unterstützt.

Author Contributions nach [CRediT \(Contributor Roles Taxonomy\)](#)

Salaymeh A.: Conceptualization, Methodology, Software, Validation, Formal analysis, Investigation, Resources, Data Curation, Writing - Original Draft. **Mehring T.;** **Kleff F.:** Review & Editing. **Peters I.:** Review & Editing, Supervision. **Bertram E.;** **Föste S.;** **Holler S.:** Review & Editing, Supervision, Project administration, Funding acquisition.

Literatur

- [1] AGEB, Hg., "Anwendungsbilanzen zur Energiebilanz Deutschland: Endenergieverbrauch nach Energieträgern und Anwendungszwecken 2011 bis 2021", Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V., 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://ag-energiebilanzen.de/wp-content/uploads/2023/01/AGEB_21p2_V3_20221222.pdf. Zugriff am: 13. März 2023.
- [2] V. Weiler, D. Lust, M. Brennenstuhl, K.-H. Brassel, E. Duminil und U. Eicker, "Automatic dimensioning of energy system components for building cluster simulation", *Applied Energy*, Jg. 313, S. 118651, 2022, doi: 10.1016/j.apenergy.2022.118651.
- [3] W. Heitkoetter, W. Medjroubi, T. Vogt und C. Agert, "Regionalised heat demand and power-to-heat capacities in Germany – An open dataset for assessing renewable energy integration", *Applied Energy*, Jg. 259, S. 114161, 2020, doi: 10.1016/j.apenergy.2019.114161.
- [4] J. F. George, S. Werner, S. Preuß, J. Winkler, A. Held und M. Ragwitz, "The landlord-tenant dilemma: Distributional effects of carbon prices, redistribution and building modernisation policies in the German heating transition", *Applied Energy*, Jg. 339, S. 120783, 2023, doi: 10.1016/j.apenergy.2023.120783.
- [5] M. N. I. Maruf, "Open model-based analysis of a 100% renewable and sector-coupled energy system—The case of Germany in 2050", *Applied Energy*, Jg. 288, S. 116618, 2021, doi: 10.1016/j.apenergy.2021.116618.
- [6] V. Bürger, T. Hesse, D. Quack, A. Palzer und B. Köhler, "Klimaneutraler Gebäudebestand 2050", CLIMATE CHANGE 06/2016, 2016. [Online]. Verfügbar unter: https://www.kea-bw.de/fileadmin/user_upload/Kommunaler_Klimaschutz/Wissensportal/Bauen_und_Sanieren/UB_A_Oeko_ISE_klimaneutraler_gebaeudebestand_2050.pdf. Zugriff am: 7. Dezember 2022.
- [7] BMWi Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, Hg., "Energieeffizienzstrategie Gebäude: Wege zu einem nahezu klimaneutralen Gebäudebestand", 2015. [Online]. Verfügbar unter: https://www.kea-bw.de/fileadmin/user_upload/Kommunaler_Klimaschutz/Wissensportal/Bauen_und_Sanieren/BMWi_energieeffizienzstrategie-gebaeude.pdf. Zugriff am: 7. Dezember 2022.
- [8] Prognos, Öko-Institut, Wuppertal Institut, Hg., "Towards a Climate-Neutral Germany by 2045: How Germany can reach its climate targets before 2050" Executive Summary conducted for

- Stiftung Klimaneutralität, Agora Energiewende and Agora Verkehrswende, 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://static.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2021/2021_04_KNDE45/A-EW_213_KNDE2045_Summary_EN_WEB.pdf. Zugriff am: 23. November 2022.
- [9] *Richtlinie für die Bundesförderung für effiziente Gebäude – Wohngebäude (BEG WG)*, Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz, Dez. 2022. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.bundesanzeiger.de/pub/publication/RQnsxjil5J2GBTH5sAC/content/RQnsxjil5J2GBTH5sAC/BAanz%20AT%2030.12.2022%20B2.pdf?inline>
- [10] P. Mellwig, M. Pehnt und J. Lempik, "Energieeffizienz als Türöffner für erneuerbare Energien im Gebäudebereich", VDP, Heidelberg, 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://www.ifeu.de/fileadmin/uploads/Publikationen/Biomasse/Landwirtschaft/_ifeu_2021__Energieeffizienz_als_T%C3%BCr%C3%B6ffner_f%C3%BCr_erneuerbare_Energien_im_Geb%C3%A4udebereich_Endbericht.pdf. Zugriff am: 19. September 2023.
- [11] H. Cischinsky und N. Diefenbach, "Datenerhebung Wohngebäudebestand 2016. Datenerhebung zu den energetischen Merkmalen und Modernisierungsraten im deutschen und hessischen Wohngebäudebestand", IWU Institute for Housing and Environment GmbH, Darmstadt, 2018.
- [12] T. Loga, B. Stein, N. Diefenbach und R. Born, *Deutsche Wohngebäudetypologie: Beispielhafte Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz von typischen Wohngebäuden - "Typology approach for building stock energy assessment"*, EPISCOPE - "Energy performance indicator tracking schemes for the continuous optimisation of refurbishment processes in European housing stocks" erarbeitet im Rahmen der EU-Projekte TABULA, 2. Aufl. Darmstadt: IWU, 2015.
- [13] Statistische Ämter des Bundes und der Länder, *Ergebnisse des Zensus 2011 zum Download: Bevölkerungs- und Wohnungszählung 2011*. [Online]. Verfügbar unter: www.zensus2011.de (Zugriff am: 23. März 2020).
- [14] P. Jochum, P. Mellwig, J. Lempik und M. Pehnt, "Ableitung eines Korridors für den Ausbau der erneuerbaren Wärme im Gebäudebereich: Kurztitel: Anlagenpotenzial", Beuth Hochschule für Technik Berlin; ifeu-Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg, 2017. [Online]. Verfügbar unter: https://www.ifeu.de/fileadmin/uploads/BeuthHS_ifeu_Anlagenpotenzial_Endbericht_2017.pdf. Zugriff am: 14. März 2023.
- [15] DWD Deutscher Wetterdienst, *Klimafaktoren (KF) für Energieverbrauchsabweise*. [Online]. Verfügbar unter: www.dwd.de/DE/leistungen/klimafaktoren/klimafaktoren (Zugriff am: 28. Februar 2023).
- [16] BKG, *Digitale Geodaten*. [Online]. Verfügbar unter: <https://gdz.bkg.bund.de/index.php/default/digitale-geodaten.html> (Zugriff am: 15. Oktober 2021).
- [17] A. Salaymeh, S. Holler, F. Pieper und J. Fischer, "Energieeffizientes Wärmenetz und Modellbetriebe: Biomasse-Integration zur Systemoptimierung in der Energieregion Hümmling mit ganzheitlichem, sektorübergreifendem Ansatz (BISON)" Schlussbericht, HAWK Hochschule für angewandte Wissenschaft und Kunst Hildesheim/Holzminde/Göttingen, 2022. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.fnr.de/index.php?id=11150&fkz=22031718>. Zugriff am: 27. September 2022.

Simulationsstudie zu Transformationsmaßnahmen zur hygienischen Absenkung der Trinkwarmwassertemperatur in Mehrfamilienhäusern mit Wärmepumpen in TRNSYS

Oliver Mercker, Modar Yasin, Christoph Büttner, Peter Pärisch

Institut für Solarenergieforschung Hameln (ISFH), Am Ohrberg 1, 31860 Emmerthal

1 Einleitung

Raumwärme und Trinkwarmwasser machen zusammen etwa ein Drittel des deutschen Endenergieverbrauchs (kurz: EEV) aus. Pro Einwohner sind dies etwa 10 MWh/a. Etwa die Hälfte davon (entspricht insgesamt 15 % des gesamten EEV) entfällt auf Mehrfamilienhäuser (vgl. **Abb. 1**).

Der personenbezogene Heizwärmebedarf ist aufgrund steigender Wärmeschutzanforderungen, milder Winter und trotz steigender Wohnflächenansprüche leicht rückläufig. Der Endenergieverbrauch für Trinkwassererwärmung beträgt weitgehend konstant ca. 5 %, so dass seine Bedeutung für den Wärmesektor zunimmt. Der damit zusammenhängende jährliche CO₂-Ausstoß beträgt immerhin 36 Mio. t.

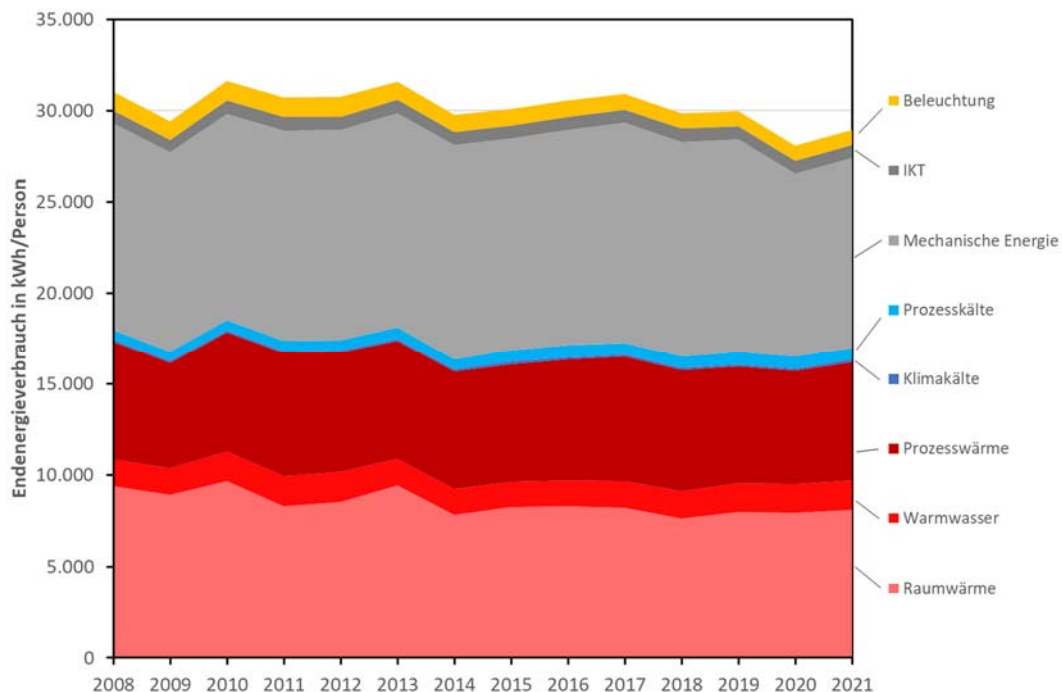


Abb. 1: Endenergieverbrauch nach Anwendungsgebieten für die Jahre 2008-2021 (nach AG Energiebilanzen)

Darüber hinaus bestimmt die Trinkwassererwärmung immer häufiger das zu erreichende Mindest-Temperaturniveau des Wärmeerzeugers. Aus hygienischen Gründen ist eine um 15 bis 20 K höhere Temperatur des Trinkwarmwassers gegenüber der eigentlichen Nutzttemperatur von etwa 40 bis 45 °C für häusliche Anwendungen notwendig. Für Großanlagen mit zentraler Trinkwassererwärmung fordern die allgemein anerkannten Regeln der Technik (kurz: a.a.R.d.T.) 60 °C am Austritt des Wärmerwärmers. Für Kleinanlagen und Einfamilienhäuser werden lediglich 50 °C empfohlen (vgl. [Dvgw04], [Dine05], [Din12] und [Vdid13]).

Diese Temperaturüberhöhung ist einer der Gründe dafür, warum regenerative Wärmeerzeuger, wie Wärmepumpe und Solarthermie, nur sehr geringe Marktanteile im Mehrfamilienhaus (MFH) oder auch anderen großen Trinkwasserinstallationen erreichen. Um dieses Hemmnis zu überwinden, sind geeignete Konzepte zur TWW-Bereitung erforderlich, wie sie im vorliegenden Beitrag mit dem Fokus auf Wärmepumpensystemen eingehend vorgestellt und analysiert werden.

1.1 Projektziele

Zielstellung des zu Grunde liegenden Projekts „WP-HYG“ ist der simulationstechnische Vergleich von Transformationsmaßnahmen zur Absenkung der Trinkwarmwassertemperatur in MFH mit hohen Dämmstandards und deren Bewertung anhand eines erdgekoppelten, Inverter-geregelten Wärmepumpensystems. Die Transformationsmaßnahmen werden in **Abschnitt 4** beschrieben.

Die Ergebnisse werden hinsichtlich energetischer und ökologischer Kennzahlen miteinander verglichen. Es ist anzunehmen, dass gegenüber dem Referenzsystem eine deutliche CO₂-Einsparung erzielt werden kann. Dies ist durch eine Vermeidung direkt-elektrischer Wärmeerzeugung zu Gunsten des WP-Einsatzes begründet.

1.2 Projektmethode

Die eben genannten Versorgungsoptionen werden in einer Simulationsstudie mit der Software TRNSYS (Version 18.04.0001) miteinander verglichen¹. Dazu wird eine gekoppelte, dynamische Jahressimulation von Gebäude und Anlagentechnik mit einer zeitlichen Auflösung von 1 min durchgeführt.

Eine kurze Beschreibung der verwendeten Gebäude- und Systemmodelle sowie der aufgeprägten Randbedingungen findet sich im Folgenden. Eine detaillierte Beschreibung sämtlicher Modelle und Randbedingungen sowie zugrunde gelegter Vereinfachungen enthält der bald erscheinende Bericht zum Projekt „WP-HYG“ (siehe www.isfh.de).

2 Gebäudemodell

Das Gebäudemodell bildet ein repräsentatives freistehendes Mehrfamilienhaus mit acht Wohneinheiten à 84 m² auf vier Etagen ab. Die Wandaufbauten entsprechen den Anforderungen an einen Neubau nach GEG. Die Gebäudehöhe beträgt 12 m über der Geländeoberkante – weitere 1,75 m befinden sich unterhalb der Geländeoberkante. Zudem werden ein unbeheizter Keller mit 183 m² sowie ein durchgehendes Treppenhaus berücksichtigt – beide jeweils als eine zusammenhängende thermische Zone. Die nachfolgende **Abb. 2** zeigt eine dreidimensionale Ansicht des Gebäudes (links) sowie eine Draufsicht mit Bezeichnungen für die einzelnen Räume einer Etage (rechts). Das Gebäude ist zudem symmetrisch aufgebaut (siehe horizontale Symmetrieachse).

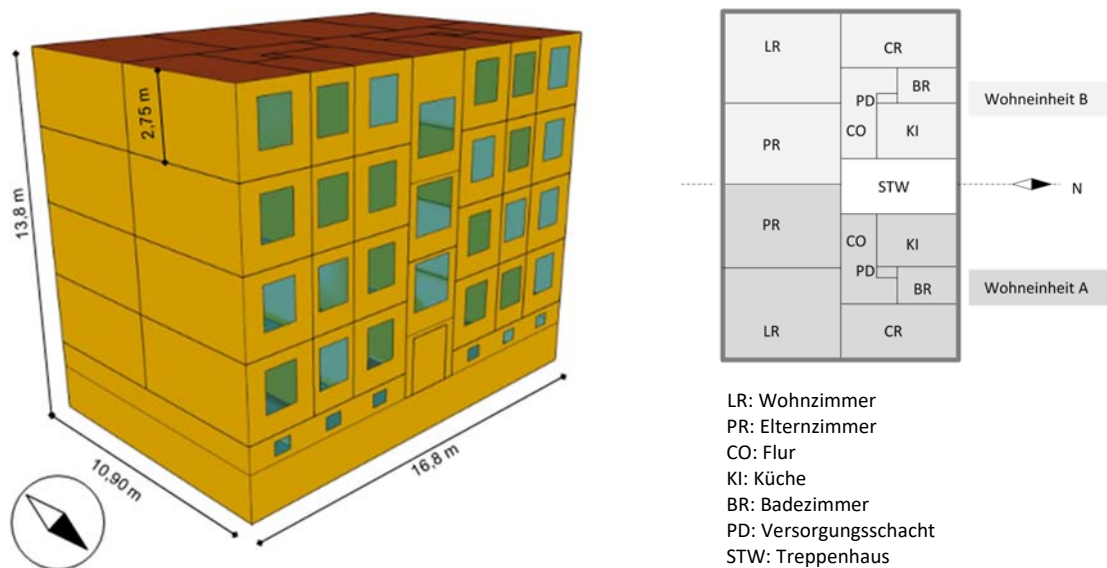


Abb. 2: 3D-Modell des untersuchten Gebäudes mit Außenmaßen (links) und Grundriss der Wohnungen (rechts)

¹ TRNSYS bietet eine umfangreiche, modular aufgebaute Simulationsumgebung zur Untersuchung dynamischer Systeme. Besonders geeignet ist es zur integrierten Betrachtung des thermischen Verhaltens von Anlagentechnik und Gebäuden mit mehreren „thermischen Zonen“ [TRN17].

Im Gegensatz zu anderen Simulationsstudien werden die Verteilungs- und Speicherverluste mit dem Gebäude gekoppelt. Dadurch wird auch der nutzbare Anteil der Wärme aus den Rohrleitungen und Speichern berücksichtigt (vgl. [Merc17]). Die Wärmeverluste aus den Steigleitungen der jeweiligen Systeme werden in den Versorgungsschächten (PD) eingekoppelt, während die Speicherverluste im unbeheizten Keller anfallen. Die Verluste der Anbindeleitungen der Fußbodenheizungen werden im unbeheizten Flur (CO) einer jeden Wohnung berücksichtigt.

3 Randbedingungen

Die für die sich noch anschließenden Betrachtungen relevante **Heizlast** des obigen Gebäudemodells beträgt etwa 13 kW und ergibt sich aus der eben dargestellten Gebäudegeometrie, den bauphysikalischen Gebäudeeigenschaften und den Raumsolltemperaturen sowie den verwendeten Klimadaten.

Die **Raumsolltemperaturen** werden wie folgt vorgegeben: Im Badezimmer werden 21 °C, im Wohnzimmer 22 °C, im Kinderzimmer 21 °C, in der Küche 20 °C und im Schlafzimmer 17 °C angestrebt, sofern der Tagesmittelwert der Umgebungstemperatur einen Wert von 15 °C nicht überschreitet. Die **Wetterdaten**: Umgebungstemperatur sowie Strahlungsdaten und Windgeschwindigkeiten entsprechen dem Testreferenzjahr (TRY) 2015-Datensatz für den Standort Hannover.

Neben der Raumheizlast ist die Vorgabe eines **TWW-Verbrauchs** erforderlich. Die TWW-Zapfprofile wurden mit der freien Software DHWcalc erzeugt (siehe [Jord17]). Zugrunde liegt eine Zapfmenge von 28 l/(Person d) – bezogen auf eine Zapftemperatur von 45 °C. Im Gebäude verteilen sich 16 Personen auf 8 Wohneinheiten mit Belegungen zwischen 1 und 4 Person(en) gemäß **Abb. 3** (links). Für das Einzelprofil einer Wohneinheit ergibt sich eine maximale Zapfrate von 15 l/min. Die Überlagerung der Wohnungszapfprofile ergibt eine maximale Gesamtzapfrate im MFH von 1454 l/h (bzw. 24,2 l/min), was einer Gleichzeitigkeit von 21,7 % entspricht. Ein exemplarisches Zapfprofil einer Wohneinheit mit 2 Personen für die erste Woche des Jahres ist in **Abb. 3** (rechts) dargestellt. Neben Spitzen bzw. einer Häufung an Zapfungen am Morgen und gegen Mittag ist eine verminderte Zapfaktivität in den Nachtstunden erkennbar.

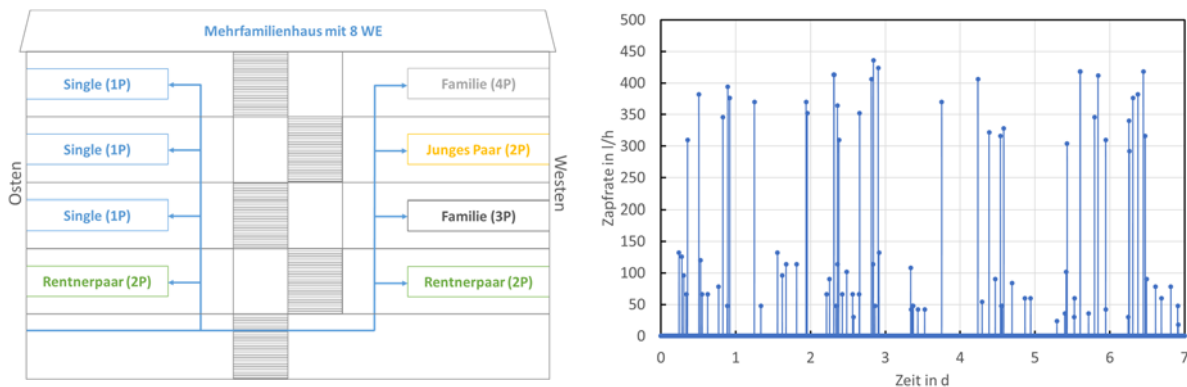


Abb. 3: Belegung der 8 Wohneinheiten (links) und erste Woche des Zapfprofils für 2-Personen-Haushalt (rechts)

In den Simulationen wird zudem eine Lüftung mit Wärmerückgewinnung sowie eine Verschattung des Gebäudes berücksichtigt, deren Spezifikationen im Projektbericht beschrieben sind.

4 Systemmodelle

In der Simulationsstudie werden vier Wärmeversorgungskonzepte samt entsprechender Varianten bzgl. der Versorgungstemperaturen betrachtet. In der folgenden **Tab. 1** ist in Form eines Prinzipschaltbildes und einer Kurzbeschreibung zunächst das Referenzsystem dargestellt.

Tab. 1: Prinzipschaltbild und Kurzbeschreibung des Referenzsystems der Simulationsstudie

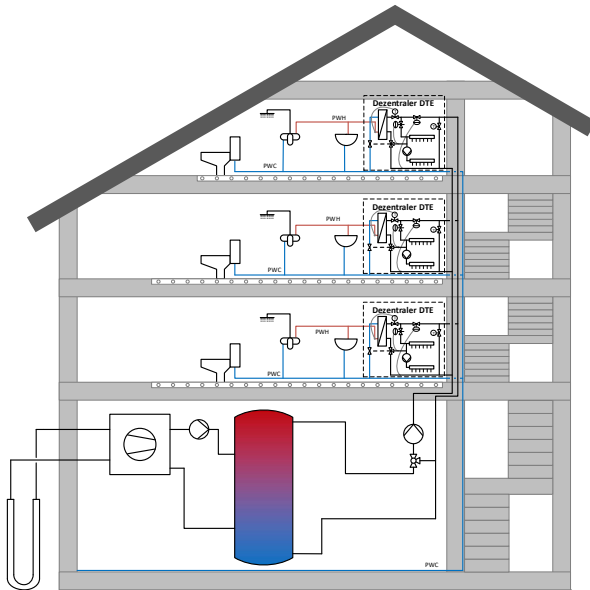
Dezentrale Elektro-Durchlauferhitzer (DLE) – Referenzsystem	
	<p>Eine zwischen 5 und 22 kW stufenlos modulierende Erdwärmepumpe versorgt einen 400 l Heizungs-puffer. Von diesem ausgehend erfolgt die Wärmeverteilung im Gebäude über ein Zwei-Leiter-Netz mit Rohrdämmung nach Norm (DIN 1988-200:2012). Die Raumheizwärmeabgabe erfolgt über Fußbodenheizungen mit witterungsgeführter Vorlauftemperatur zwischen 25 und 35 °C. Die TWW-Bereitung erfolgt ausschließlich über die ausreichend leistungsstarken, dezentralen elektrischen Durchlauferhitzer (DLE), wobei ein konstantes TWW-Nutztemperaturniveau von 45 °C sichergestellt wird.</p>
<p>Hinweis: Das Konzept DLE stellt die Referenzsituation bezüglich der WP-Effizienz, des minimalen Wärmebedarfs des Gebäudes (aufgrund minimaler Verteil- und Speicherverluste) und der maximalen CO₂-Emissionen dar.</p>	

Diesem Referenzsystem werden drei Transformationsmaßnahmen gegenübergestellt, deren Prinzipschaltbilder und Kurzbeschreibungen in der nachfolgenden **Tab. 2** zusammengefasst sind.

Tab. 2: Prinzipschaltbilder und Kurzbeschreibung der simulierten Transformationsmaßnahmen (inkl. Varianten)

Zentraler Durchfluss-Trinkwassererwärmer (FWS4L)	
	<p>Eine zwischen 5 und 22 kW stufenlos modulierende Erdwärmepumpe versorgt einen 1600 l Pufferspeicher. Aus diesem erfolgt die Wärme-lieferung an die Raumheizung und TWW-Bereitung. Die Wärmeverteilung erfolgt dabei über ein Vier-Leiter-Netz mit Rohrdämmung nach Norm (DIN 1988-200:2012). Die Raumheizwärmeabgabe erfolgt über Fußbodenheizungen mit witterungsgeführter Vorlauftemperatur zwischen 25 und 35 °C. Die TWW-Bereitung erfolgt über einen zentralen Durchfluss-Trinkwassererwärmer (DTE, oder auch „Frischwasserstation“, kurz: FWS), wobei drei Varianten der sekundärseitigen Austritts-temperatur aus der FWS und Zirkulationsrück-lauftemperatur zur FWS betrachtet werden:</p> <ol style="list-style-type: none"> (1) 60/55 °C gemäß a.a.R.d.T.; (2) 55/52 °C gemäß der Schweizer Norm SIA 385-1; (3) 48/45 °C mit Ultrafiltration (UFC). <p>Die Zapf-temperatur bleibt dabei stets 45 °C.</p>
<p>Hinweis: Die drei in der Kurzbeschreibung genannten Varianten werden im Folgenden mit den Kürzeln FWS4L60 für (1); FWS4L55 für (2) und FWS4L48 für (3) bezeichnet.</p>	

Dezentrale Durchfluss-Trinkwassererwärmer (WST2L)



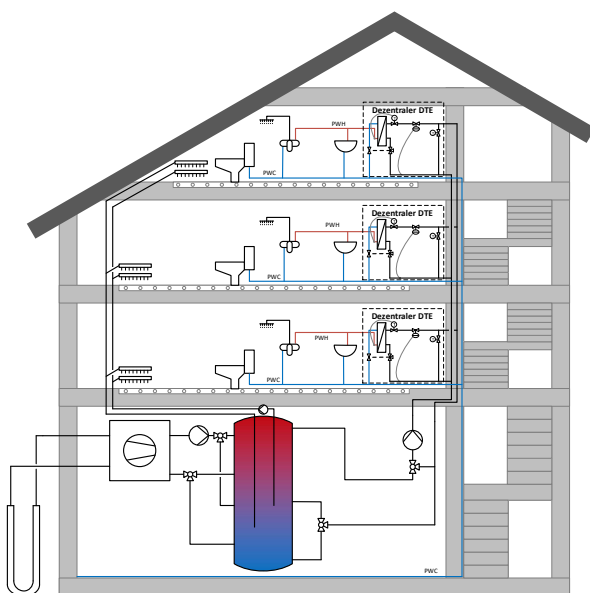
Eine zwischen 5 und 22 kW stufenlos modulierende Erdwärmepumpe versorgt einen 1600 l Pufferspeicher. Die Wärmeverteilung erfolgt über ein Zwei-Leiter-Netz mit Rohrdämmung nach Norm (DIN 1988-200:2012) zu den dezentralen DTE (sog. „Wohnungsstationen“, kurz WST), wo ein Teil der Wärme an die Fußbodenheizungen mit konstanter T_{VL} von 35 °C ausgekoppelt wird. In den dezentralen DTE erfolgt auch die TWW-Bereitung, wobei fünf Varianten der sekundärseitigen TWW-Vorlauftemperatur aus der WST betrachtet werden:

- (1) T_{WST} 52 °C gemäß der Schweizer Norm SIA 385-1
- (2) T_{WST} 50 °C gemäß a.a.R.d.T.
- (3) T_{WST} 45 °C gemäß üblicher Praxis
- (4) T_{WST} 38 °C mit E-Heizstab auf 45 °C
- (5) T_{WST} 29 °C mit E-Heizstab auf 45 °C

Die Zapftemperatur des TWW ist stets 45 °C.

Hinweis: Diese fünf genannten Varianten werden im Folgenden mit den Kürzeln WST2L52 für (1); WST2L50 für (2); WST2L45 für (3); WST2L38 für (4) und WST2L29 für (5) bezeichnet.

Dezentrale Durchfluss-Trinkwassererwärmer (WST4L)



Eine zwischen 5 und 22 kW stufenlos modulierende Erdwärmepumpe versorgt einen 1600 l Pufferspeicher. Aus diesem erfolgt die Wärmelieferung an die Raumheizung und TWW-Bereitung. Die Wärmeverteilung erfolgt über ein Vier-Leiter-Netz mit Rohrdämmung nach Norm (DIN 1988-200:2012). Die Raumheizung erfolgt über Fußbodenheizungen mit witterungsgeführter T_{VL} von 25 bis 35 °C. In den dezentralen DTE erfolgt die TWW-Bereitung, wobei fünf Varianten der sekundärseitigen TWW-Vorlauftemperatur aus der WST betrachtet werden:

- (1) T_{WST} 52 °C gemäß der Schweizer Norm SIA 385-1
- (2) T_{WST} 50 °C gemäß a.a.R.d.T.
- (3) T_{WST} 45 °C gemäß üblicher Praxis
- (4) T_{WST} 38 °C mit E-Heizstab auf 45 °C
- (5) T_{WST} 29 °C mit E-Heizstab auf 45 °C

Die Zapftemperatur des TWW ist stets 45 °C.

Hinweis: Die fünf genannten Varianten werden im Folgenden mit den Kürzeln WST4L52 für (1); WST4L50 für (2); WST4L45 für (3); WST4L38 für (4) und WST4L29 für (5) bezeichnet.

5 Auswertegrößen

Die Bewertung der Simulationen erfolgt anhand von drei wesentlichen Auswertegrößen, deren Berechnung und notwendige Eingangsgrößen im Folgenden kurz dargestellt werden.

5.1 Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe

Die Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe JAZ_{WP} bewertet die Effizienz des Wärmepumpenbetriebs an sich und ist daher definiert als der Quotient von dessen Nutzen zu dessen Aufwand. Der Nutzen besteht hierbei in der gelieferten Kondensatorwärmemenge Q_{cond} , während der Aufwand im Kompressorstromverbrauch $W_{el,WP}$ liegt. Somit ergibt sich die folgende Berechnungsgleichung:

$$JAZ_{WP} = \frac{Q_{cond}}{W_{el,WP}}$$

5.2 Jahresarbeitszahl des Gesamtsystems

Auch für das Gesamtsystem lässt sich eine Jahresarbeitszahl JAZ_{SYS} als Quotient von dessen Nutzen zu dessen Aufwand bestimmen, welche als Maß für dessen Effizienz geeignet ist. Als Nutzen ist hierbei der „tatsächliche“ Bedarf an TWW Q_{DHW} und Raumheizwärme Q_{SH} anzusehen, wobei als Wert für Q_{SH} der minimale Raumheizwärmeeintrag aller Simulationen verwendet wird. Als Aufwand ist die Summe aller mit der jeweiligen Systemkonfiguration verbundenen Stromverbräuche anzusehen. Dies sind die Stromverbräuche des WP-Kompressors $W_{el,WP}$, aller jeweils vorhandenen Pumpen² $\sum_i W_{pump,i}$ sowie der ggfs. vorhandenen Elektro-Durchlauferhitzer $W_{TWW,el}$ in den Wohnungen oder Wohnungstationen und der Ultrafiltration. Der Energieverbrauch der Ultrafiltration W_{UFC} entspricht dem Stromverbrauch der Bypass-Pumpe, die ganzjährig mit 50 W-Leistungsaufnahme betrieben wird. Hinzu kommt ein erhöhter Kompressorstromverbrauch für die täglichen Spülverluste in Höhe von 40 l/d. (**Anm.:** Die Ultrafiltration ist für diesen Gebäudetyp nicht optimal.) Somit ergibt sich die folgende Berechnungsgleichung:

$$JAZ_{SYS} = \frac{Q_{DHW} + Q_{SH}}{W_{el,WP} + \sum_i W_{pump,i} + W_{TWW,el} + W_{UFC}}$$

5.3 CO₂-Emissionen

Als letzte Auswertegröße, die eine Bewertung der ökologischen Aspekte der Wärmeversorgungskonzepte ermöglichen soll, werden die CO₂-Emissionen betrachtet. Diese ergeben sich anhand der Stromverbräuche der einzelnen Varianten, die mit den jeweiligen CO₂-Faktor für Strom multipliziert werden. Der CO₂-Faktor gibt dabei an, wie viel CO₂ im Zuge der Nutzung einer Kilowattstunde eines Endenergieträgers emittiert wird. Für Strom beträgt der CO₂-Faktor aktuell 560 g/kWh (gemäß [Gese20]). Somit ergibt sich folgende Berechnungsgleichung:

$$m_{CO_2} = (W_{el,WP} + W_{TWW,el} + \sum_i W_{pump,i} + W_{UFC}) \cdot 560 \frac{g_{CO_2}}{kWh}$$

6 Simulationsergebnisse

In **Abb. 4** sind einerseits die zwei „Quellen“ für Wärmeeinträge in das Gebäude als breite Säulen im Hintergrund dargestellt: der Kondensatorwärmeeintrag $Q_{WP,cond}$ in hellgrün und der Wärmeeintrag der dezentralen Elektrodurchlauferhitzer $Q_{TWW,el}$ in hellrot; während andererseits die „Wärmesenken“ im Gebäude – einschließlich der Verlustpfade – aufgeführt werden: die Wärmemenge $Q_{TWW,th}$, die zur Erwärmung des TWW eingesetzt wurde³, in blau; der Stromverbrauch zur TWW-Erwärmung $Q_{TWW,el}$ in gelb, die Raumheizwärmemenge Q_H in braun, die Verteilverluste des Heizungssteigleitungen $Q_{d,loss}$ in lila, die Verteilverluste der TWW-Steigleitungen $Q_{d,loss,DHW}$ in rot, die Zirkulationswärmeverluste $Q_{d,loss,circ}$ in beige, die Speicherverluste $Q_{St,Loss}$ in dunkelgrau, sowie zuletzt die Spülverluste der Ultrafiltration Q_{UFC} in dunkelgrün.

² Welche Pumpen in den jeweiligen Varianten berücksichtigt werden, ist im Projektbericht dokumentiert.

³ In den Fällen wo elektrische TWW-Bereitung bzw. Nacherwärmung auftritt, ergibt sich die TWW-Nutzwärme als Summe von $Q_{TWW,el}$ und $Q_{TWW,th}$.

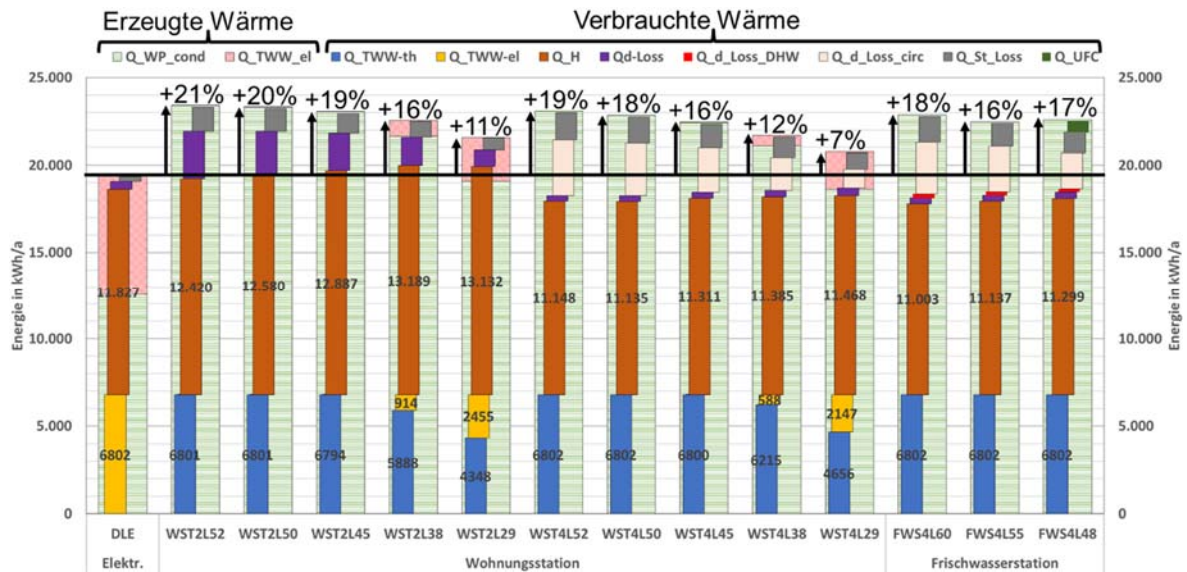


Abb. 4: Vergleich aller simulierten Systeme und ihrer Varianten anhand des Wärmebedarfs

Der TWW-Nutzen aller Systeme ist stets gleich (6,8 MWh/a) und bildet daher den Sockel der Wärmesenken im MFH. Darüber liegen unterschiedlich hohe Raumheizwärmeeinträge und Verlustpfade. Den minimalen Gesamtwärmeeintrag ins MFH verzeichnet das Konzept DLE, wobei es nur 7 % unter dem Wert von WST4L29 aber um 21 % unter dem Wärmeeintrag von WST2L52 liegt. Zudem lässt sich die Tendenz erkennen, dass WST2L-Varianten (ohne dezentrale DLE) höhere Wärmeeinträge als FWS4L-Varianten und zuletzt WST4L-Varianten (ohne DLE) aufweisen. Eine Reduktion der Systemtemperaturen senkt stets die Verteil- und Speicherverluste sowie Gesamtwärmeeinträge ins Gebäude.

Insgesamt ist jedoch ersichtlich, dass alle Versorgungskonzepte relativ ähnliche Gesamtwärmeeinträge ins Gebäude aufweisen, womit die damit verbundene Effizienz als wesentliches Bewertungskriterium in den Vordergrund rückt. In **Abb. 5** sind daher die jeweiligen Stromverbräuche aller Versorgungsvarianten (Wärmepumpenstrom $W_{el,WP}$ in grau, dezentraler Elektro-Heizstab $W_{TWW,el}$ in dunkelgelb und Pumpenstromverbräuche $W_{el,Pump}$ in schwarz) zusammen mit der Jahresarbeitszahl der WP JAZ_{WP} als Dreieck und des Systems insgesamt JAZ_{SYS} als Kreis dargestellt.

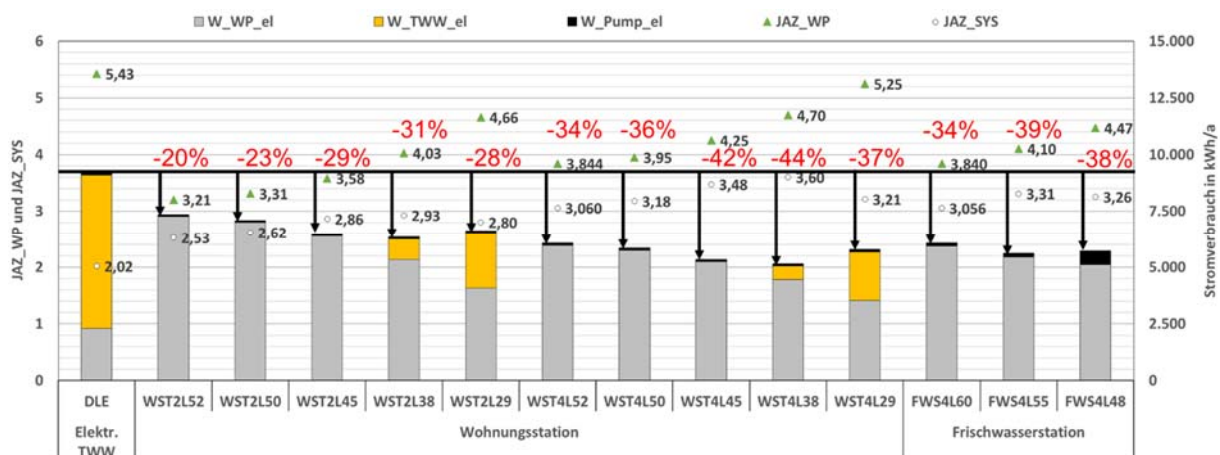


Abb. 5: Vergleich aller untersuchten Systeme anhand der Strombedarfe sowie JAZ_{WP} und JAZ_{SYS}

Die höchste JAZ_{WP} hat mit einem Wert von 5,43 das System DLE, während zugleich der Anteil der WP an der Gesamtwärmeversorgung in diesem Fall am geringsten ist (nur für Raumheizung). Die zweithöchste JAZ_{WP} schafft das System WST4L29 mit einem Wert von 5,25, jedoch bei einer zugleich relativ niedrigen Systemjahresarbeitszahl JAZ_{SYS} von 3,21. Die höchste JAZ_{SYS} erreicht WST4L38 mit einem Wert von 3,60 bei einer gleichzeitig guten JAZ_{WP} von 4,70. Der Stromverbrauch von WST4L38

liegt trotz dezentraler elektrischer Nacherwärmung des TWW um – 44 % unterhalb des Referenzwerts von 9,2 MWh/a des Konzepts DLE.

Bei den WST-Varianten zeigt sich (sowohl bei den 2L- als auch bei den 4L-Varianten), dass eine Absenkung der Vorlauftemperatur am Austritt der DTE zwar stets zu einer Steigerung der WP-Effizienz führt, jedoch ab einem gewissen Punkt der zunehmende, dezentrale elektrische Nachheizbedarf wieder zu einer Verschlechterung der Systemeffizienz führt.

Zudem kann grundsätzlich festgestellt werden, dass die Varianten mit Vierleiternetz (FWS und WST) stets höhere Systemeffizienzwerte aufweisen als die Zweileiternetzvarianten der WST, da die WP in diesem Fall von den niedrigen Temperaturanforderungen der Fußbodenheizung profitieren kann.

Überdies zeigt sich, dass das Konzept FWS4L48 mit Ultrafiltration trotz Dauerbetriebs einer 50 W Umwälzpumpe im Zirkulationsbypass zu den effizientesten Konzepten gehört. Die thermischen Verluste bei den Spülvorgängen wurden zwar nicht dynamisch simuliert, jedoch rechnerisch berücksichtigt: Angenommen wird eine Menge von 40 Litern Spülwasser pro Tag, das von ca. 10 °C (Kaltwassertemperatur) auf 48 °C (Zirkulationstemperatur) erwärmt werden muss. Dabei wird unterstellt, dass diese Erwärmung bei einer Leistungszahl der WP von 2,8 erfolgt, womit sich ein Zusatzkompressorstromverbrauch von ca. 230 kWh pro Jahr ergibt. Zugleich zeigt sich jedoch, dass die FWS4L55 ohne Ultrafiltration effizienter arbeitet, eine UFC bei solch kleinen TWW-Lasten also nicht sinnvoll ist.

Als nächstes folgt **Abb. 6**, in der die flächenspezifischen CO₂-Emissionen der untersuchten Versorgungskonzepte als graue Balken dargestellt sind. Um diese zu ermitteln wurden die jeweiligen Verbräuche an Strom mit dem zugehörigen CO₂-Faktor multipliziert und durch die Gebäudenutzfläche (nach [Gese20] entspricht diese hier 800 m²) dividiert.

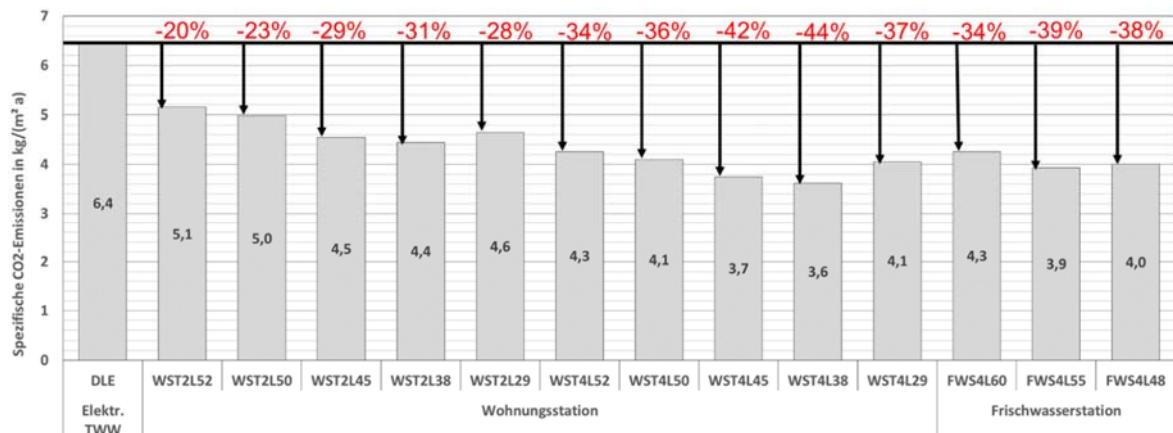


Abb. 6: Vergleich der CO₂-Emissionen der betrachteten Versorgungsoptionen

Die maximalen CO₂-Emissionen treten mit 6,4 kg/(m² a) beim DLE-Konzept auf. Die minimalen CO₂-Emissionen treten beim Konzept WST4L38 auf (- 44,0 % gegenüber DLE). Zudem ist die Tendenz erkennbar, dass die WST2L-Varianten schlechter abschneiden als die FWS4L-Varianten und zuletzt die WST4L-Varianten. Zudem ergeben sich durch die Absenkung der Systemtemperaturen bei jedem Konzept niedrigere CO₂-Emissionen.

7 Zusammenfassung und Fazit

Für MFH-Neubauten ist der Einsatz von Fußbodenheizung empfohlen, wenn mit Wärmepumpen geheizt werden soll. Allerdings kommt der Trinkwassererwärmung und den damit in Zusammenhang stehenden Zirkulationsverlusten eine große Bedeutung zu. In vorliegendem Beitrag sind daher verschiedene Versorgungsoptionen miteinander verglichen worden. Eine zentrale Durchfluss-Trink-

wassererwärmung („Frischwasserstation“) mit Vier-Leiter-Netz wird mit sieben dezentralen Trinkwassererwärmern verglichen. Erstens elektrische Durchlauferhitzer, zweitens dezentrale Durchfluss-Trinkwassererwärmer („Wohnungsstationen“) im 2-Leiter-Netz, drittens „Wohnungsstationen“ im 4-Leiter-Netz sowie jeweils zwei hybride Wohnungsstation mit elektrischer Nacherwärmung.

Darüber hinaus sind verschiedene Austrittstemperaturen des Trinkwassererwärmers (52, 50, 45, 38 und 29 °C) für die Wohnungsstationen sowie 60, 55 & 48 °C bei den Frischwasserstationen betrachtet worden. Letztere ist auszuklammern, weil eine Ultrafiltration bei einem solch kleinen Gebäude ökologisch und ökonomisch keinen Sinn ergibt. Die Varianz der Trinkwarmwassertemperatur soll einen Beitrag zur energetischen Bewertung von Maßnahmen zur Vermeidung von Legionellenwachstum leisten.

Es zeigt sich, dass die Wärmepumpe einen Großteil des Trinkwarmwassers erwärmen sollte, aber auch der gezielte Einsatz von direkt-elektrischer Nacherwärmung durchaus noch leichte Verbesserungen der WP- und Systemeffizienz durch eine Reduzierung von Speicher- und Verteilverlusten erzielen kann. Die Vier-Leiter-Varianten mit Durchfluss-Trinkwassererwärmung schneiden in dem untersuchten Gebäude besser ab als die Zwei-Leiter-Varianten. Dies liegt daran, dass die Wärmepumpeneffizienz stark davon profitiert, wenn die niedrigeren Vorlauftemperaturen der Fußbodenheizung bis zur Wärmepumpe geführt werden.

Sollte es zu einer Verschärfung der Betriebsregeln für Wohnungsstationen (auf 52 °C wie in der Schweiz) kommen, ist die zentrale Frischwasserstation ökonomisch wie ökologisch vorteilhaft.

8 Danksagung

Das diesem Beitrag zugrundeliegende Vorhaben WP-HYG wurde mit Mitteln des enercity-Fonds proKlima gefördert. Das Institut für Solarenergieforschung Hameln erhält zudem eine Grundfinanzierung vom Land Niedersachsen. Die Autoren möchten sich daher bei proKlima und dem Land Niedersachsen für die Unterstützung bedanken. Die Autoren sind für den Inhalt des Beitrags verantwortlich.

9 Quellenverzeichnis

[Din12] DIN 1988-200: Technische Regeln für Trinkwasser-Installationen - Teil 200: Installation Typ A (geschlossenes System) - Planung, Bauteile, Apparate, Werkstoffe, Beuth, 2012

[Dine05] DIN EN 806-2: Technische Regeln für Trinkwasser-Installationen - Teil 2: Planung, Beuth, 2005

[Dvgw04] Trinkwassererwärmungs- und Trinkwasserleitungsanlagen - Technische Maßnahmen zur Verminderung des Legionellenwachstums - Planung, Errichtung, Betrieb und Sanierung von Trinkwasser-Installationen. In: DVGW W551 (Hrsg.) Deutsche Vereinigung des Gas- und Wasserfaches e.V., 2004

[Gese20] Gesetz zur Vereinheitlichung des Energieeinsparrechts für Gebäude und zur Änderung weiterer Gesetze, PDF-Dokument, URL: GEG 2020, Seite 62 genommen: https://geg-info.de/geg/2020.08.13_bundesgesetzblatt_geg_2020_verkundung.pdf, letzter Aufruf am: 02.11.2023

[Jord17] Jordan, U.; Vajen, K.: Handbuch „DHWcalc“ - Werkzeug zur Generierung von Trinkwasser-Zapfprofilen auf statistischer Basis, Version 2.02b. Universität Kassel, März 2017

[Merc17] Mercker, O.; Arnold, O.: Ansätze zur Reduktion der konventionell erzeugten Wärmeverteilungsverluste in solar unterstützten Mehrfamilienhäusern. Abschlussbericht, Hameln, 2017

[TRN17] Klein, S.A.; Beckmann, W.A.; Mitchell, J.W.; et al.: TRNSYS 17 Documentation – Volume 1 „Getting Started“. Solar Energy Laboratory – University of Wisconsin-Madison, USA, 2012

[Vdid13] VDI/DVGW 6023: Hygiene in Trinkwasser-Installationen - Anforderungen an Planung, Ausführung, Betrieb und Instandhaltung, 2013