

# **Dynamische Strommarktemissionsfaktoren in der Lebenszyklusanalyse von Gebäuden und Quartieren**

Von der Fakultät für Bauingenieurwesen der Rheinisch-Westfälischen  
Technischen Hochschule Aachen zur Erlangung des akademischen Grades  
eines Doktors der Ingenieurwissenschaften genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Tobias Blanke

**Berichter:**

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Christoph van Treeck  
Prof. Dr.-Ing. Bernd Döring

Tag der mündlichen Prüfung: 29.09.2025

Diese Dissertation ist auf den Internetseiten der Universitätsbibliothek  
online verfügbar.



---

## Kurzzusammenfassung

Zur Bewertung der ökologischen Nachhaltigkeit von Gebäuden und Quartieren stellen Lebenszyklusanalysen (LZA) ein zentrales Instrument dar. Da Gebäude Lebensdauern von mehreren Jahrzehnten aufweisen, ist insbesondere die Entwicklung des Stromsektors für die Betriebsphase von entscheidender Bedeutung.

Der Stromsektor befindet sich im Zuge der Energiewende in einem tiefgreifenden Wandel. Fossile, CO<sub>2</sub>-intensive Erzeugungskapazitäten werden zunehmend durch erneuerbare Energien ersetzt, wodurch die Emissionsintensität des Stroms sinkt. Gleichzeitig nimmt die zeitliche Volatilität der Strombereitstellung durch Photovoltaik und Windkraft zu, was eine differenzierte Betrachtung der Emissionen nach Tages- und Jahresverlauf erfordert.

LZA, die Effekte wie diese berücksichtigen, werden als dynamische Lebenszyklusanalysen (DLZA) bezeichnet. Im Gebäudebereich spielen neben der Entwicklung des Stromsektors auch technologische Entwicklungen, klimawandelbedingte Wetteränderungen, Degradation der Gebäudetechnik und Dämmung sowie Recycling eine Rolle.

In dieser Arbeit wird untersucht, wie sich diese dynamischen Faktoren – insbesondere die Dekarbonisierung und Variabilität des Stromsektors – auf die optimale Dimensionierung von Dämmung, Speichern und Gebäudetechnik auswirken. Dazu werden vier Gebäudetypen und zwei Quartiere mit verschiedenen Wärmepumpensystemen betrachtet.

Zur Untersuchung der Fragestellungen wurden Lastprofile für die unterschiedlichen Gebäudetypen und Quartiere generiert und mit einer gemischt-ganzzahligen linearen Optimierung (MILP) gekoppelt. Dieses Vorgehen erlaubt es, die energetische Systemauslegung – insbesondere für Wärmepumpen, Speichern und Dämmung – simultan unter ökologischen Kriterien zu optimieren.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Berücksichtigung der Stromsektordekarbonisierung die optimale Dämmstärke in allen Fällen etwa halbiert und damit den dominierenden Einflussfaktor darstellt. Zudem wird deutlich, dass nur stündlich aufgelöste Stromdaten eine realistische Dimensionierung elektrischer Speicher erlauben. Die Arbeit leistet damit einen Beitrag zur Weiterentwicklung künftiger Energie- und Nachhaltigkeitsstandards, indem sie die Grenzen gängiger, statischer Bewertungsmethoden aufzeigt.

## **Abstract**

Life cycle assessments (LCAs) are a key tool for evaluating the environmental sustainability of buildings and districts. Since buildings have a lifespan of several decades, developments in the electricity sector are particularly important for the operational phase.

The electricity sector is undergoing profound change as a result of the energy transition. Fossil fuel-based, CO<sub>2</sub>-intensive generation capacities are increasingly being replaced by renewable energies, which reduce the emission intensity of electricity. At the same time, the temporal volatility of electricity supply from photovoltaics and wind power is increasing, which requires a differentiated view of emissions over the course of the day and year.

LCA that take effects such as these into account are referred to as dynamic life cycle assessments. In the building sector, technological developments, climate change-related weather changes, degradation of building technology and insulation, and recycling play a role alongside developments in the electricity sector.

This thesis examines how these dynamic factors—in particular the decarbonization and variability of the electricity sector—affect the optimal dimensioning of insulation, storages, and building technology. To this end, four building types and two districts with different heat pump systems are considered.

To investigate the questions, load profiles were generated for the different building types and districts and coupled with a mixed-integer linear optimization (MILP). This approach allows the energy system design—especially for heat pumps, storages, and insulation—to be optimized simultaneously according to ecological criteria.

The results show that taking the decarbonization of the electricity sector into account roughly halves the optimal insulation thickness in all cases, making it the dominant influencing factor. It also becomes clear that only hourly electricity data allows for realistic dimensioning of electrical storage systems. The thesis thus contributes to the further development of future energy and sustainability standards by highlighting the limitations of common static assessment methods.

## Vorwort und Dank

Die Bewertung der ökologischen Nachhaltigkeit von Gebäuden und Quartieren gewinnt vor dem Hintergrund des Klimawandels und der angestrebten Treibhausgasneutralität zunehmend an Bedeutung. Gebäude weisen Lebensdauern von mehreren Jahrzehnten auf und prägen damit langfristig Energieverbräuche und Emissionen. Insbesondere der Stromsektor, der sich im Zuge der Energiewende in einem tiefgreifenden Transformationsprozess befindet, spielt dabei eine zentrale Rolle für die ökologische Bewertung der Betriebsphase von Gebäuden.

Klassische Lebenszyklusanalysen basieren häufig auf statischen Annahmen, die den zeitlichen Wandel von Energiesystemen, Technologien und Umweltbedingungen nur unzureichend abbilden. Die zunehmende Verfügbarkeit erneuerbarer Energien, die damit einhergehende zeitliche Volatilität der Strombereitstellung sowie langfristige Entwicklungen wie Dekarbonisierung, technologische Alterung und klimawandelbedingte Wetteränderungen erfordern jedoch eine differenziertere Betrachtung.

Vor diesem Hintergrund untersucht die vorliegende Arbeit den Einfluss dynamischer Faktoren auf die ökologische Optimierung von Gebäuden und Quartieren. Der Fokus liegt dabei insbesondere auf der Entwicklung des Stromsektors und deren Auswirkungen auf die Dimensionierung von Dämmung, Speichern und Gebäudetechnik. Mithilfe dynamischer Lebenszyklusanalysen und einer gekoppelten gemischt-ganzzahligen linearen Optimierung wird eine simultane Auslegung energetischer Systeme unter ökologischen Kriterien ermöglicht.

Die Arbeit ist mit dem Anspruch entstanden, einen Beitrag zur Weiterentwicklung von Planungs- und Bewertungsmethoden im Gebäudesektor zu leisten und die Grenzen gängiger statischer Ansätze aufzuzeigen. Ziel ist es, fundierte Entscheidungsgrundlagen für zukünftige Energie- und Nachhaltigkeitsstandards bereitzustellen und damit einen kleinen, aber konkreten Beitrag zur Transformation des Gebäudesektors zu leisten.

Diese Dissertation wäre ohne die Unterstützung vieler Menschen in dieser Form nicht möglich gewesen.

Mein besonderer Dank gilt Prof. Dr. Bernd Döring, der mich während meiner Tätigkeit an der FH Aachen betreut und die Entstehung dieser Arbeit maßgeblich begleitet hat. Durch seine fachliche Unterstützung, seine kontinuierliche Ansprechbarkeit und sein Vertrauen hat er den zentralen Rahmen für diese Dissertation geschaffen. Ebenso danke ich Joachim Götttsche, der mich in besonderem Ma-

ße fachlich begleitet und gefördert hat. Seine langjährige Erfahrung und seine wertvollen Impulse haben entscheidend zur inhaltlichen Ausrichtung und Weiterentwicklung dieser Arbeit beigetragen.

Für die Übernahme der externen Betreuung und Begutachtung danke ich Christoph van Treeck und Jerome Frisch. Durch ihre Perspektive, ihre kritischen Rückmeldungen und ihre fachlichen Anregungen haben sie wesentlich zur wissenschaftlichen Einordnung und Qualitätssicherung dieser Arbeit beigetragen.

Ein großer Dank gilt meinen Kolleginnen und Kollegen sowie meinen Freunden. Besonders hervorheben möchte ich Markus Hagenkamp und Markus Kohn, mit denen mich sowohl das gemeinsame Studium als auch eine langjährige fachliche und persönliche Verbundenheit verbindet. Besonders gefreut hat mich zudem die mehrjährige gemeinsame Arbeit mit Markus Hagenkamp. Beide haben diese Arbeit durch wertvolle Rückmeldungen, Diskussionen und kritisches Feedback wesentlich unterstützt. Darüber hinaus danke ich Felix Pfeiffer. Seine offenherzige und ermutigende Art sowie der kollegiale Austausch waren eine wertvolle Unterstützung im Arbeitsalltag.

Ganz besonders danke ich meiner Freundin Nora Blase für ihre Geduld, ihre Unterstützung in intensiven Phasen und ihr wertvolles Feedback. Ihr Rückhalt war eine große Hilfe auf dem Weg zum Abschluss dieser Arbeit.

Meiner Familie gilt mein aufrichtiger Dank. Ich danke meinen Eltern Iris und Martin Blanke sowie meiner Patentante Christiane Müller für ihre langjährige Unterstützung, ihr Vertrauen und ihre Ermutigung auf dem gesamten Weg bis zu dieser Dissertation.

Nicht zuletzt möchte ich Murphy, meinem Hund und treuen Begleiter der letzten eineinhalb Jahre, danken – für regelmäßige Pausen, neue Perspektiven und die Erinnerung daran, dass auch jenseits von Modellen, Optimierungen und Datensätzen Ausgleich und Bodenhaftung wichtig sind.

Aachen, February 2026

Tobias Blanke

---

# Inhaltsverzeichnis

<b>1. Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1. Motivation . . . . .	1
1.2. Problemstellung . . . . .	3
1.3. Forschungshypothesen . . . . .	4
1.4. Abgrenzung . . . . .	5
1.5. Struktureller Aufbau der Arbeit . . . . .	8
<b>2. Grundlagen</b>	<b>9</b>
2.1. Lebenszyklusanalyse von Gebäuden . . . . .	9
2.1.1. Normen . . . . .	10
2.1.2. Dynamische Lebenszyklusanalyse . . . . .	13
2.1.3. Lebenszyklusanalysedatenbanken . . . . .	21
2.1.4. Wiederverwertungspotenzial in der Lebenszyklusanalyse von Gebäuden . . . . .	23
2.2. Studien zum Stromsektor . . . . .	25
2.2.1. Die großen fünf Stromsektorstudien . . . . .	26
2.2.2. Stromsektor-GWP-Datensätze . . . . .	29
2.3. Methoden zur energetischen Bewertung von Gebäuden . . . . .	30
2.3.1. Monatsbilanzverfahren (DIN V 18599) . . . . .	31
2.3.2. Ganzjahressimulation (DIN EN ISO 52016) . . . . .	32
2.4. Lastprofile und Gleichzeitigkeit in Quartiersnetzen . . . . .	33
2.5. Wetterdaten . . . . .	35
2.5.1. Testreferenzjahre (DWD) . . . . .	37
2.5.2. Meteonorm . . . . .	37
2.6. Betriebs- und Investitionsoptimierung von Energiesystemen . . . . .	38
2.7. Sensitivitätsanalyse . . . . .	42
<b>3. Stand der Technik</b>	<b>44</b>
3.1. Cluster 1: Energieumwandlung . . . . .	44
3.1.1. Wärmepumpen . . . . .	44
3.1.2. Photovoltaik . . . . .	48

3.1.3.	Geothermie . . . . .	50
3.1.4.	Wasserbasierte elektrische Heizsysteme . . . . .	53
3.2.	Cluster 2: Energiespeicherung . . . . .	54
3.2.1.	Thermische Speicher . . . . .	54
3.2.2.	Elektrische Energiespeicher . . . . .	56
3.3.	Cluster 3: Energieverteilung und -nutzung . . . . .	58
3.3.1.	Lüftungstechnik / Wärmerückgewinnung . . . . .	58
3.3.2.	Rohrnetze und hydraulische Verteilung . . . . .	59
3.3.3.	Heiz- und Kühlflächen . . . . .	60
3.3.4.	Automatisierte Verschattung . . . . .	60
3.4.	Cluster 4: Gebäudehülle . . . . .	61
3.4.1.	Funktionen und Klassifizierung von Dämmstoffen . . . . .	62
3.4.2.	Degradation der Dämmwirkung über die Lebensdauer . . . . .	65
3.4.3.	Fenster . . . . .	66
3.5.	Cluster 5: Systemintegration in Quartiersenergiekonzepte . . . . .	68
<b>4.</b>	<b>Modellierungsansätze zur dynamischen Lebenszyklusanalyse</b>	<b>70</b>
4.1.	Modellierungsansätze zur zeitlichen Auflösung von Stromsektoremissionen . . . . .	70
4.1.1.	50-jährlich-konstant (50-J-K) . . . . .	72
4.1.2.	50-stündlich-konstant (50-S-K) . . . . .	73
4.1.3.	50-jährlich-dekarb (50-J-D) . . . . .	74
4.1.4.	50-stündlich-dekarb (50-S-D) . . . . .	74
4.1.5.	10-stündlich-dekarb (10-S-D) . . . . .	75
4.2.	Modellierungsansätze zur Untersuchung der Haupthypothesen H3 bis H6 . . . . .	76
4.2.1.	Marginale Emissionen . . . . .	76
4.2.2.	Wettereinfluss . . . . .	77
4.2.3.	Degradation der Gebäudetechnik und Gebäudehülle . . . . .	77
4.2.4.	Wiederverwertungspotential . . . . .	79
<b>5.</b>	<b>Optimierung von Gebäuden und Quartieren auf LZA-Basis</b>	<b>80</b>
5.1.	Erstellung von Last-, Erzeugungs- und Umfeldprofilen . . . . .	80
5.1.1.	Wetterdaten . . . . .	81

---

5.1.2. Gebäudelastprofile . . . . .	82
5.1.3. Quartierslastprofile . . . . .	91
5.1.4. Erzeugungsprofil Photovoltaik . . . . .	94
5.1.5. Emissionen für den Stromsektor . . . . .	94
5.2. Profilselktion und Aufbereitung für die Optimierung . . . . .	95
5.2.1. Zeitreihen . . . . .	96
5.2.2. Emissionsdaten . . . . .	96
5.3. Emissionsminimierung . . . . .	99
5.3.1. Optimierungsziel . . . . .	99
5.3.2. Gebäudetechnikvarianten . . . . .	100
5.3.3. Bedarfsabbildung . . . . .	103
5.3.4. Heizstab . . . . .	104
5.3.5. Luft-Wasser-Wärmepumpe . . . . .	105
5.3.6. Sole-Wasser-Wärmepumpe . . . . .	106
5.3.7. Geothermie . . . . .	107
5.3.8. Thermische und elektrische Speicher . . . . .	109
5.3.9. Photovoltaik . . . . .	111
5.3.10. Einstellungen vom Optimierer . . . . .	111
5.4. Auswertung . . . . .	112
<b>6. Ergebnisse und Diskussion</b>	<b>113</b>
6.1. Einfluss der Stromsektordekarbonisierung auf die Dämmstärke . . .	113
6.1.1. Einfamilienhaus . . . . .	114
6.1.2. Bürogebäude . . . . .	116
6.1.3. Bildungsgebäude . . . . .	118
6.1.4. Gewerbehalle . . . . .	120
6.1.5. Einfamilienhaussiedlung . . . . .	123
6.1.6. Gewerbequartier . . . . .	124
6.2. Einfluss der Stromsektordaten in stündlicher Auflösung auf Spei- chersysteme . . . . .	126
6.3. Einfluss von marginale Stromemissionswerten auf die Dämmstärke	131
6.4. Einfluss von Wetterdaten, welche den Klimawandel berücksichtigen	134
6.5. Einfluss der Degradation der Gebäudetechnik und Dämmung . . . .	138

---

6.6. Einfluss der Berücksichtigung des Recyclingpotentials auf die Dämmstärke und Emissionen . . . . .	140
<b>7. Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>145</b>
7.1. Zusammenfassung . . . . .	145
7.2. Ausblick . . . . .	147
<b>Literatur</b>	<b>149</b>
<b>A. Anhang Kapitel 5</b>	<b>196</b>
<b>B. Anhang Kapitel 6</b>	<b>203</b>
B.1. Einfluss der Stromsektordaten in stündlicher Auflösung auf Speichersysteme . . . . .	204
B.2. Einfluss von marginale Stromemissionswerten auf die Dämmstärke	207
B.3. Einfluss von Wetterdaten, welche den Klimawandel berücksichtigen	210
B.4. Einfluss der Degradation der Gebäudetechnik und Dämmung . . . .	216
B.5. Einfluss der Berücksichtigung des Recyclingpotentials auf die Dämmstärke und Emissionen . . . . .	219

# Abbildungsverzeichnis

2.1. Phasen der LZA nach der DIN EN ISO 14040 und Tschiggerl [TSC15; DIN21b] . . . . .	11
2.2. Module und Phasen im Lebenszyklus eines Gebäudes nach DIN EN 15978 . . . . .	12
2.3. Open-LCA-Datenbanken [GRE24a] . . . . .	21
2.4. Notwendige Nettostromerzeugung für die großen fünf Stromsektorstudien [STI22] . . . . .	27
2.5. Schematische Abbildung des Widerstands- und Kapazitätsmodells der DIN EN ISO 52016 [BAL20b] . . . . .	32
2.6. Prinzipskizze der verschiedenen Modelle um Lastprofile mithilfe eines Gleichzeitigkeitsfaktors zu skalieren [BLA24b] . . . . .	35
2.7. Methoden der Zeitreihenaggregation für Energiesystemmodelle [HOF20] . . . . .	41
3.1. Leistungszahlen von Wärmepumpen: Exemplarische Darstellung für Luft-Wasser- (L-W-WP) und Sole-Wasser- (S-W-WP) Wärmepumpen bei verschiedenen Temperaturniveaus der Wärmequelle . .	47
3.2. Energieeffizienzverhältnis einer generischen Wärmepumpe . . . . .	48
3.3. Typen von Erdwärmesonden (links: 2U-Sonde, rechts: Koaxialsonde)	52
3.4. Dämmstoffmarkt Deutschlands 2021 nach Volumen [TRE23] . . . . .	64
3.5. Wärmeleitfähigkeit verschiedener Dämmstoffe [TRE23] . . . . .	64
4.1. Überblick der Kategorien für die verschiedenen Modellierungsansätze . . . . .	71
4.2. Visualisierung der verschiedenen Modellierungsansätze für den Stromsektor . . . . .	73
5.1. Methodik zur Untersuchung der Forschungshypothesen (Typ. P. = Typische Perioden) . . . . .	81
5.2. Baupläne des repräsentativ untersuchten Einfamilienhauses . . . . .	86

---

5.3. Schematische 3D-Darstellung der untersuchten Bürogebäude-Geometrien . . . . .	87
5.4. Schematische 3D-Darstellung des Bildungsgebäudes . . . . .	88
5.5. 3D-Darstellung der Gewerbehalle (rechts) [REG19] . . . . .	89
5.6. Lageplan der Einfamilienhaussiedlung . . . . .	92
5.7. Lageplan des Gewerbepark (Schulgebäude (gelb), Universitätsgebäude (orange), Bürogebäude (rot), Hallenbauten mit einer Gewerbenutzung (blau), Hallenbauten mit einer Gewerbenutzung und Büro- ronutzung (grün) . . . . .	93
5.8. Darstellung der verschiedenen Gebäudetechnikvarianten für den Heizfall und den kombinierten Heiz- und Kühlfall . . . . .	102
5.9. Erklärung der Ergebnisgrafiken anhand von sortierten Ergebnissensitivitäten mit wichtigen Kenngrößen (links) und einem Violin-Plot mit integriertem Boxplot (rechts) . . . . .	112
6.1. Optimale Dämmstärken für das Einfamilienhaus in Abhängigkeit von Betriebsfall (nur Heizen bzw. Heizen + Kühlen), Gebäudetechnikvariante sowie den Modellierungsansätzen für den Stromsektor als Violinplots mit integriertem Boxplot für Optimierungen über ein volles Jahr sowie über typische Perioden . . . . .	115
6.2. Optimale Dämmstärken für das Bürogebäude in Abhängigkeit von Betriebsfall (nur Heizen bzw. Heizen + Kühlen), Gebäudetechnikvariante sowie den Modellierungsansätzen für den Stromsektor als Violinplots mit integriertem Boxplot für Optimierungen über ein volles Jahr sowie über typische Perioden . . . . .	117
6.3. Optimale Dämmstärken für das Bildungsgebäude in Abhängigkeit von Betriebsfall (nur Heizen bzw. Heizen + Kühlen), Gebäudetechnikvariante sowie den Modellierungsansätzen für den Stromsektor als Violinplots mit integriertem Boxplot für Optimierungen über ein volles Jahr sowie über typische Perioden . . . . .	119

- 
- 6.4. Optimale Dämmstärken für die Gewerbehalle in Abhängigkeit von Betriebsfall (nur Heizen bzw. Heizen + Kühlen), Gebäudetechnikvariante sowie den Modellierungsansätzen für den Stromsektor als Violinplots mit integriertem Boxplot für Optimierungen über ein volles Jahr sowie über typische Perioden . . . . . 121
- 6.5. Optimale Dämmstärken für die Einfamilienhaussiedlung für den kombinierten Heiz- und Kühlfall in Abhängigkeit der Gebäudetechnikvariante sowie den Modellierungsansätzen für den Stromsektor als Violinplots mit integriertem Boxplot für Optimierungen mit typischen Perioden . . . . . 123
- 6.6. Optimale Dämmstärken für das Gewerbequartier für den kombinierten Heiz- und Kühlfall in Abhängigkeit der Gebäudetechnikvariante sowie den Modellierungsansätzen für den Stromsektor als Violinplots mit integriertem Boxplot für Optimierungen mit typischen Perioden . . . . . 125
- 6.7. Optimale Speichergrößen für das Einfamilienhaus in Abhängigkeit von Betriebsfall (nur Heizen bzw. Heizen + Kühlen), Gebäudetechnikvariante sowie den Modellierungsansätzen für den Stromsektor als Violinplots mit integriertem Boxplot für Optimierungen über ein volles Jahr sowie über typische Perioden . . . . . 127
- 6.8. Optimale Speichergrößen für die Einfamilienhaussiedlung für den kombinierten Heiz- und Kühlfall in Abhängigkeit der Gebäudetechnikvariante sowie den Modellierungsansätzen für den Stromsektor als Violinplots mit integriertem Boxplot für Optimierungen mittels typischer Perioden . . . . . 129
- 6.9. Optimale Speichergrößen der elektrischen Speicher des Gewerbequartiers für den kombinierten Heiz- und Kühlfall in Abhängigkeit der Gebäudetechnikvariante sowie den Modellierungsansätzen für den Stromsektor als Violinplots mit integriertem Boxplot für Optimierungen mittels typischer Perioden . . . . . 131

- 
- 6.10. Optimale Dämmstärken für das Einfamilienhaus in Abhängigkeit von Betriebsfall (nur Heizen bzw. Heizen + Kühlen), Gebäudetechnikvariante sowie den Modellierungsansätzen für den Stromsektor als Violinplots mit integriertem Boxplot für Optimierungen mit marginalen sowie durchschnittlichen Stromsektoremissionswerten . . . . 133
- 6.11. Optimale Emissionswerte für das Einfamilienhaus in Abhängigkeit von Betriebsfall (nur Heizen bzw. Heizen + Kühlen), Gebäudetechnikvariante sowie den Modellierungsansätzen für den Stromsektor als Violinplots mit integriertem Boxplot für Optimierungen mit klimawandelangepassten Wetterdaten sowie nicht angepassten Wetterdaten (Wettereinfl. = Wettereinfluss) . . . . . 135
- 6.12. Optimale Dämmstärken für das Einfamilienhaus in Abhängigkeit von Betriebsfall (nur Heizen bzw. Heizen + Kühlen), Gebäudetechnikvariante sowie den Modellierungsansätzen für den Stromsektor als Violinplots mit integriertem Boxplot für Optimierungen mit klimawandelangepassten Wetterdaten sowie nicht angepassten Wetterdaten (Wettereinfl. = Wettereinfluss) . . . . . 137
- 6.13. Optimale Dämmstärken für das Einfamilienhaus in Abhängigkeit von Betriebsfall (nur Heizen bzw. Heizen + Kühlen), Gebäudetechnikvariante sowie den Modellierungsansätzen für den Stromsektor als Violinplots mit integriertem Boxplot für Optimierungen mit Degradation der Gebäudetechnik und Dämmung sowie ohne Degradation . . . . . 139
- 6.14. Optimale Dämmstärken für das Einfamilienhaus in Abhängigkeit von Betriebsfall (nur Heizen bzw. Heizen + Kühlen), Gebäudetechnikvariante sowie den Modellierungsansätzen für den Stromsektor als Violinplots mit integriertem Boxplot für Optimierungen mit und ohne Einfluss des Recyclingpotentials . . . . . 141
- 6.15. Optimale Emissionswerte für das Einfamilienhaus in Abhängigkeit von Betriebsfall (nur Heizen bzw. Heizen + Kühlen), Gebäudetechnikvariante sowie den Modellierungsansätzen für den Stromsektor als Violinplots mit integriertem Boxplot für Optimierungen mit und ohne Einfluss des Recyclingpotentials . . . . . 143

- 
- B.1. Optimale Speichergrößen für das Bürogebäude in Abhängigkeit von Betriebsfall (nur Heizen bzw. Heizen + Kühlen), Gebäudetechnikvariante sowie den Modellierungsansätzen für den Stromsektor als Violinplots mit integriertem Boxplot für Optimierungen über ein volles Jahr sowie über typische Perioden . . . . . 204
- B.2. Optimale Speichergrößen für das Bildungsgebäude in Abhängigkeit von Betriebsfall (nur Heizen bzw. Heizen + Kühlen), Gebäudetechnikvariante sowie den Modellierungsansätzen für den Stromsektor als Violinplots mit integriertem Boxplot für Optimierungen über ein volles Jahr sowie über typische Perioden . . . . . 205
- B.3. Optimale Speichergrößen für die Gewerbehalle in Abhängigkeit von Betriebsfall (nur Heizen bzw. Heizen + Kühlen), Gebäudetechnikvariante sowie den Modellierungsansätzen für den Stromsektor als Violinplots mit integriertem Boxplot für Optimierungen über ein volles Jahr sowie über typische Perioden . . . . . 206
- B.4. Optimale Dämmstärken für das Bildungsgebäude in Abhängigkeit von Betriebsfall (nur Heizen bzw. Heizen + Kühlen), Gebäudetechnikvariante sowie den Modellierungsansätzen für den Stromsektor als Violinplots mit integriertem Boxplot für Optimierungen mit marginalen sowie durchschnittlichen Stromsektoremissionswerten . . . 207
- B.5. Optimale Dämmstärken für das Bürogebäude in Abhängigkeit von Betriebsfall (nur Heizen bzw. Heizen + Kühlen), Gebäudetechnikvariante sowie den Modellierungsansätzen für den Stromsektor als Violinplots mit integriertem Boxplot für Optimierungen mit marginalen sowie durchschnittlichen Stromsektoremissionswerten . . . . 208
- B.6. Optimale Dämmstärken für die Gewerbehalle in Abhängigkeit von Betriebsfall (nur Heizen bzw. Heizen + Kühlen), Gebäudetechnikvariante sowie den Modellierungsansätzen für den Stromsektor als Violinplots mit integriertem Boxplot für Optimierungen mit marginalen sowie durchschnittlichen Stromsektoremissionswerten . . . . 209

- 
- B.7. Optimale Emissionswerte für das Bildungsgebäude in Abhängigkeit von Betriebsfall (nur Heizen bzw. Heizen + Kühlen), Gebäudetechnikvariante sowie den Modellierungsansätzen für den Stromsektor als Violinplots mit integriertem Boxplot für Optimierungen mit klimwandelangepassten Wetterdaten sowie nicht angepassten Wetterdaten (Wettereinfl. = Wettereinfluss) . . . . . 210
- B.8. Optimale Dämmstärken für das Bildungsgebäude in Abhängigkeit von Betriebsfall (nur Heizen bzw. Heizen + Kühlen), Gebäudetechnikvariante sowie den Modellierungsansätzen für den Stromsektor als Violinplots mit integriertem Boxplot für Optimierungen mit klimwandelangepassten Wetterdaten sowie nicht angepassten Wetterdaten (Wettereinfl. = Wettereinfluss) . . . . . 211
- B.9. Optimale Emissionswerte für das Bürogebäude in Abhängigkeit von Betriebsfall (nur Heizen bzw. Heizen + Kühlen), Gebäudetechnikvariante sowie den Modellierungsansätzen für den Stromsektor als Violinplots mit integriertem Boxplot für Optimierungen mit klimwandelangepassten Wetterdaten sowie nicht angepassten Wetterdaten (Wettereinfl. = Wettereinfluss) . . . . . 212
- B.10. Optimale Dämmstärken für das Bürogebäude in Abhängigkeit von Betriebsfall (nur Heizen bzw. Heizen + Kühlen), Gebäudetechnikvariante sowie den Modellierungsansätzen für den Stromsektor als Violinplots mit integriertem Boxplot für Optimierungen mit klimwandelangepassten Wetterdaten sowie nicht angepassten Wetterdaten (Wettereinfl. = Wettereinfluss) . . . . . 213
- B.11. Optimale Emissionswerte für die Gewerbehalle in Abhängigkeit von Betriebsfall (nur Heizen bzw. Heizen + Kühlen), Gebäudetechnikvariante sowie den Modellierungsansätzen für den Stromsektor als Violinplots mit integriertem Boxplot für Optimierungen mit klimwandelangepassten Wetterdaten sowie nicht angepassten Wetterdaten (Wettereinfl. = Wettereinfluss) . . . . . 214

- 
- B.12. Optimale Dömmstärken für die Gewerbehalle in Abhängigkeit von Betriebsfall (nur Heizen bzw. Heizen + Kühlen), Gebäudetechnikvariante sowie den Modellierungsansätzen für den Stromsektor als Violinplots mit integriertem Boxplot für Optimierungen mit klimawandelangepassten Wetterdaten sowie nicht angepassten Wetterdaten (Wettereinfl. = Wettereinfluss) . . . . . 215
- B.13. Optimale Dömmstärken für das Bildungsgebäude in Abhängigkeit von Betriebsfall (nur Heizen bzw. Heizen + Kühlen), Gebäudetechnikvariante sowie den Modellierungsansätzen für den Stromsektor als Violinplots mit integriertem Boxplot für Optimierungen mit Degradation der Gebäudetechnik und Dämmung sowie ohne Degradation . . . . . 216
- B.14. Optimale Dömmstärken für das Bürogebäude in Abhängigkeit von Betriebsfall (nur Heizen bzw. Heizen + Kühlen), Gebäudetechnikvariante sowie den Modellierungsansätzen für den Stromsektor als Violinplots mit integriertem Boxplot für Optimierungen mit Degradation der Gebäudetechnik und Dämmung sowie ohne Degradation 217
- B.15. Optimale Dömmstärken für die Gewerbehalle in Abhängigkeit von Betriebsfall (nur Heizen bzw. Heizen + Kühlen), Gebäudetechnikvariante sowie den Modellierungsansätzen für den Stromsektor als Violinplots mit integriertem Boxplot für Optimierungen mit Degradation der Gebäudetechnik und Dämmung sowie ohne Degradation 218
- B.16. Optimale Dömmstärken für das Bildungsgebäude in Abhängigkeit von Betriebsfall (nur Heizen bzw. Heizen + Kühlen), Gebäudetechnikvariante sowie den Modellierungsansätzen für den Stromsektor als Violinplots mit integriertem Boxplot für Optimierungen mit und ohne Einfluss des Recyclingpotentials . . . . . 219
- B.17. Optimale Emissionswerte für das Bildungsgebäude in Abhängigkeit von Betriebsfall (nur Heizen bzw. Heizen + Kühlen), Gebäudetechnikvariante sowie den Modellierungsansätzen für den Stromsektor als Violinplots mit integriertem Boxplot für Optimierungen mit und ohne Einfluss des Recyclingpotentials . . . . . 220

---

B.18. Optimale Dämmstärken für das Bildungsgebäude in Abhängigkeit von Betriebsfall (nur Heizen bzw. Heizen + Kühlen), Gebäudetechnikvariante sowie den Modellierungsansätzen für den Stromsektor als Violinplots mit integriertem Boxplot für Optimierungen mit und ohne Einfluss des Recyclingpotentials . . . . .	221
B.19. Optimale Emissionswerte für das Bürogebäude in Abhängigkeit von Betriebsfall (nur Heizen bzw. Heizen + Kühlen), Gebäudetechnikvariante sowie den Modellierungsansätzen für den Stromsektor als Violinplots mit integriertem Boxplot für Optimierungen mit und ohne Einfluss des Recyclingpotentials . . . . .	222
B.20. Optimale Dämmstärken für die Gewerbehalle in Abhängigkeit von Betriebsfall (nur Heizen bzw. Heizen + Kühlen), Gebäudetechnikvariante sowie den Modellierungsansätzen für den Stromsektor als Violinplots mit integriertem Boxplot für Optimierungen mit und ohne Einfluss des Recyclingpotentials . . . . .	223
B.21. Optimale Emissionswerte für die Gewerbehalle in Abhängigkeit von Betriebsfall (nur Heizen bzw. Heizen + Kühlen), Gebäudetechnikvariante sowie den Modellierungsansätzen für den Stromsektor als Violinplots mit integriertem Boxplot für Optimierungen mit und ohne Einfluss des Recyclingpotentials . . . . .	224

---

# Tabellenverzeichnis

2.1. Abgedeckte dynamische Einflussfaktoren in ausgewählten DLZA-Studien im Gebäudekontext (x = berücksichtigt, - = nicht berücksichtigt) . . . . .	20
2.2. Gegenüberstellung ausgewählter LZA-datenbanken . . . . .	22
2.3. Überblick zentraler Klimaneutralitätsstudien für Deutschland . . . . .	26
5.1. Sensitivitäten nach Gebäudetyp . . . . .	84
5.2. Schichtaufbauten des Einfamilienhauses . . . . .	85
5.3. Schichtaufbauten des Bürogebäudes . . . . .	88
5.4. Schichtaufbauten des Bildungsgebäude . . . . .	89
5.5. Schichtaufbauten der Gewerbehalle . . . . .	90
5.6. Materialeigenschaften . . . . .	91
5.7. Flächen des Gewerbeparks . . . . .	94
A.1. Emissionswerte für die Gebäudetechnik inklusive des Recyclingpotentials (Teil 1) . . . . .	197
A.2. Emissionswerte für die Gebäudetechnik inklusive des Recyclingpotentials (Teil 2) . . . . .	198
A.3. Emissionswerte für die Gebäudetechnik exklusive des Recyclingpotentials (Teil 1) . . . . .	199
A.4. Emissionswerte für die Gebäudetechnik exklusive des Recyclingpotentials (Teil 2) . . . . .	200
A.5. Emissionswerte für die Dämmung inklusive des Recyclingpotentials	201
A.6. Emissionswerte für die Dämmung inklusive des Recyclingpotentials	202

# Abkürzungsverzeichnis

10-S-D	10-Stündlich-Dekarbonisiert (vgl. Kapitel 4.1)
50-J-D	50-Jährlich-Dekarbonisiert (vgl. Kapitel 4.1)
50-J-K	50-Jährlich-Konstant (vgl. Kapitel 4.1)
50-S-D	50-Stündlich-Dekarbonisiert (vgl. Kapitel 4.1)
50-S-K	50-Stündlich-Konstant (vgl. Kapitel 4.1)
5GDHC	5. Generation der Wärmenetze (5th Generation District Heating and Cooling)
ADPE	Abiotischer Ressourcenverbrauch – Elemente (Abiotic Depletion Potential, Elements)
ADPF	Abiotischer Ressourcenverbrauch – fossile Brennstoffe (Abiotic Depletion Potential, Fossil)
AP	Versauerungspotenzial (Acidification Potential)
BAU	Das unambitionierte Klimaschutzszenario Business-As-Usual von Seckinger et al. [SEC21]
BDEW	Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft
BIPV	Gebäude-integrierte Photovoltaik (Building-Integrated Photovoltaics)
CAP	Das ambitionierte Klimaschutzszenario Climate-Action-Plan von Seckinger et al. [SEC21]
CFC-11	Fluorchlorkohlenwasserstoff 11 / Trichlorfluormethan (CFC-11)
COP	Leistungszahl (Coefficient Of Performance) [-]
DEF	Durchschnittlicher Emissionsfaktor
DIN	Deutsches Institut für Normung
DLZA	Dynamische Lebenszyklusanalyse (Dynamic Life Cycle Assessment)
DWD	Deutscher Wetterdienst
EER	Energieeffizienzverhältnis (Energy Efficiency Ratio) [-]
EN	Europäische Norm

---

EP	Eutrophierungspotenzial (Eutrophication Potential)
EPS	Expandiertes Polystyrol
GEG	Gebäudeenergiegesetz
Geo	Geothermische Anlage
GWP	Treibhauspotenzial (Global Warming Potential)
HS	Heizstab
IPCC	Zwischenstaatlicher Ausschuss für Klimawandel (Intergovernmental Panel on Climate Change)
ISO	Internationale Organisation für Normung (International Organization for Standardization)
L-W-WP	Luft-Wasser-Wärmepumpe
LP	Lineare Programmierung
LZA	Lebenszyklusanalyse (Life Cycle Assessment)
MEF	Marginaler Emissionsfaktor
MILP	Gemischt-ganzzahlige lineare Programmierung (Mixed Integer Linear Programming)
NLP	Nicht Lineare Programmierung
NMVOC	Nicht-Methan-flüchtige organische Verbindungen (Non-Methane Volatile Organic Compounds)
NREL	National Renewable Energy Laboratory
ODP	Ozonabbaupotenzial (Ozone Depletion Potential)
PEF	Primärenergiefaktor - Verhältnis von Endenergie zur Primärenergie
POCP	Sommersmogpotenzial / Photochemisches Ozonbildungspotenzial (Photochemical Ozone Creation Potential)
PUR	Polyurethan
PV	Photovoltaik
RCP	Repräsentative Konzentrationspfade (Representative Concentration Pathways) des IPCC
S-W-WP	Sole-Wasser-Wärmepumpe
Sp	Speicher

TRJ	Testreferenzjahr
VDI	Verein Deutscher Ingenieure e. V.
VIP	Vakuumisulationspaneele
W-W-WP	Wasser-Wasser-Wärmepumpe
XPS	Extrudiertes Polystyrol

# Formelzeichenverzeichnis

$F_c$	Abminderungsfaktor nach DIN 4108 [DIN13] [-]
$A_{PV}$	Fläche der PV-Anlage [m <sup>2</sup> ]
$b$	Achsenabschnitt für die Emissionsberechnung der verschiedenen Gebäudetechnikkomponenten [-]
$E_{m, \text{Betrieb}}$	Emissionen während der Betriebsphase []
$b_d$	Binäre Entscheidungsvariable für die Dämmstärke [-]
$b_{\text{Speicher}}$	Binäre Entscheidungsvariable für die Speichergröße [-]
$d_{\text{neu}}$	Neue Dämmstärke [m]
$d_{\text{alt}}$	Ursprüngliche Dämmstärke [m]
$r$	Degradationsrate [1/a]
$\delta t$	Zeitschrittlänge [s]
$\Delta \dot{Q}_{M, \text{con}}$	Gefalteter monatlicher Durchschnitt der geothermischen Wärmelast [W]
$\Delta T_{\text{max}}$	Maximale Temperaturdifferenz zwischen Erdsonde und Erdreich [K]
$\Delta T_{\text{min}}$	Minimale Temperaturdifferenz zwischen Erdsonde und Erdreich [K]
$e$	Emissionsfaktor [kg/(kW h)]
$E_{\text{einkauf}}$	Eingekaufte Menge an elektrischer Energie [kW h]
$P_{\text{el}}$	Elektrische Leistung [W]
$P_{\text{el.B.}}$	Bedarf an elektrischer Energie [W]
$E_m$	Emissionen [kg]
$\Delta E$	Gespeicherte oder extrahierte Energiemenge bis zum Zeitschritt $t$ [J]
$E_{\text{max}}$	Maximal speicherbare Energiemenge [J]
$E_{\text{total}}$	Maximal wählbare Speichergröße [J]
$E_p$	Gespeicherte Energiemenge am Anfang von Periode $p$ [J]
$E$	Gespeicherte Energiemenge [J]

$\eta_{\text{selbst}}$	Selbstentladungsrate [1/s]
$\eta_{\text{Laden}}$	Ladeeffizienz [-]
$\eta_{\text{Entladen}}$	Entladeeffizienz [-]
$E_{\text{verkauf}}$	Verkaufte Menge an elektrischer Energie [kW h]
$F$	Selbstentladungsfaktor für mehr als eine Periode [-]
$f_{\text{PV}}$	Flächenfaktor der PV-Anlage zur maximal produzierbaren Energiemenge [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]
$g_{\text{p}}$	Spitzenleistungs-g-Funktion [-]
$g^*$	Monatliche g-Funktion [-]
$\dot{Q}_{\text{h}}$	Heizleistung [W]
$n$	Luftwechselrate [1/h]
$J$	Anzahl der Jahre im Betrachtungszeitraum [-]
$T$	Anzahl der Zeitschritte während eines Jahres des Betrachtungszeitraums oder der typischen Perioden [-]
$k$	Steigungskoeffizient für die Herstellungsbedingten Emissionen [Umweltauswirkung / Komponentengröße]
$\dot{Q}_{\text{K}}$	Kältebedarf [W]
$\dot{Q}_{\text{K},i}$	Kältebedarf für die Dämmstärkenvariante $i$ [W]
$Em_{\text{Konstruktion}}$	Index für die Konstruktion der Dämmung oder Gebäudetechnik [-]
$\dot{Q}_{\text{C}}$	Kühlleistung [W]
$L$	Tiefe der einzelnen Erdsonde [m]
$\lambda_{\text{Erde}}$	Thermischer Widerstand des Erdreiches [ $\text{W}/(\text{m K})$ ]
$l$	Lebensdauer der Gebäudetechnikkomponente [a]
$p_{\text{cop}}$	Linearer Leistungskoeffizient für die Leistungszahl der Wärmepumpe [- oder $1/^\circ\text{C}$ ]
$p_{\text{eer}}$	Linearer Leistungskoeffizient für das Energieeffizienzverhältnis der Wärmepumpe [- oder $1/^\circ\text{C}$ ]
$p_{\text{el}}$	Linearer Leistungskoeffizient für die elektrische Leistung der Wärmepumpe [W oder $\text{W}/^\circ\text{C}$ ]

$m$	Monat im Jahr [-]
$M$	Anzahl derselben Perioden hintereinander [-]
$N$	Anzahl an Bohrlöchern [-]
$\rho$	Periodennummer [-]
$N_p$	Anzahl an Zeitschritten in der Periode [-]
$P_{\text{Batt,E}}$	Elektrische Energie aus dem elektrischen Speicher [W]
$P_{\text{Batt,L}}$	Elektrische Energie für das Laden des elektrischen Speichers [W]
$P_{\text{einkauf}}$	Vom Stromnetz bezogene elektrische Leistung [W]
$P_{\text{HS}}$	Elektrischer Energiebedarf des Heizstabs [W]
$P_{\text{HS,max}}$	Maximale Leistung des Heizstabs [W]
$P_{\text{L-W-WP,H}}$	Elektrischer Energiebedarf für die Luft-Wasser-Wärmepumpe im Heizbetrieb [W]
$P_{\text{L-W-WP,K}}$	Elektrischer Energiebedarf für die Luft-Wasser-Wärmepumpe im Kühlbetrieb [W]
$\dot{Q}_{\text{max}}$	Monatlich maximal aufgenommene Wärme [W]
$\dot{Q}_{\text{min}}$	Monatlich maximal abgegebene Wärme [W]
$P_{\text{Laden}}$	Ladeleistung [W]
$P_{\text{Entladen}}$	Entladeleistung [W]
$\dot{Q}_{\text{M}}^-$	Monatlich durchschnittliche vom Erdreich aufgenommene Wärmeenergie [W]
$\dot{Q}_{\text{M}}^+$	Monatlich durchschnittliche dem Erdreich entzogene Wärmeenergie [W]
$P_{\text{pv}}$	erzeugte Menge an elektrischer Energie aus PV [W]
$P_{\text{S-W-WP}}$	Elektrischer Energiebedarf für die Sole-Wasser-Wärmepumpe [W]
$P_{\text{verkauf}}$	Ins Stromnetz eingespeiste elektrische Leistung [W]
$\dot{Q}_{\text{Geo,E}}$	Aufgenommene Wärmeenergie der geothermischen Anlage [W]
$\dot{Q}_{\text{Geo,L}}$	Abgegebene Wärmeenergie der geothermischen Anlage [W]
$\dot{Q}_{\text{HS}}$	Produzierte Wärmeenergie des Heizstabs [W]

$\dot{Q}_{KS,E}$	Aufgegebene Wärmeenergie des Kältespeichers [W]
$\dot{Q}_{KS,L}$	Abgegebene Wärmeenergie des Kältespeichers [W]
$\dot{Q}_{L-W-WP,H}$	Produzierte Wärmeenergie der Luft-Wasser-Wärmepumpe im Heizbetrieb [W]
$\dot{Q}_{L-W-WP,K}$	Entzogene Wärmeenergie der Luft-Wasser-Wärmepumpe im Kühlbetrieb [W]
$\dot{Q}_{L-W-WP,max}$	Maximale Wärmepumpenleistung der Luft-Wasser-Wärmepumpe [W]
$\dot{Q}_{S-W-WP,H}$	Produzierte Wärmeenergie der Sole-Wasser-Wärmepumpe [W]
$\dot{Q}_{S-W-WP,K}$	Entzogene Wärmeenergie der Sole-Wasser-Wärmepumpe [W]
$\dot{Q}_{S-W-WP,max}$	Maximale Wärmepumpenleistung der Sole-Wasser-Wärmepumpe [W]
$T_{in,Quelle}$	Quellentemperatur [°C]
$\dot{Q}_{WS,E}$	Abgegebene Wärmeenergie aus dem Wärmespeicher [W]
$\dot{Q}_{WS,L}$	Aufgenommene Wärmeenergie in dem Wärmespeicher [W]
$R_b$	Bohrlochwiderstand [m K/W]
$T_{in,Senke}$	Senktemperatur [°C]
$\dagger$	Zeitschritt während des Jahres [-]
$\dot{Q}_H$	Wärmebedarf [W]
$\dot{Q}_{H,i}$	Wärmebedarf für die Dämmstärkenvariante $i$ [W]
$w$	Anzahl des Zeitschrittes während des Jahres [-]

# 1. Einleitung

Dieses Kapitel führt in die Arbeit ein, erläutert die Motivation und Problemstellung, formuliert die Forschungshypothesen, grenzt den Untersuchungsrahmen ab und skizziert den Aufbau der Arbeit.

## 1.1. Motivation

Der anthropogene Klimawandel führt zu einem deutlichen Anstieg der globalen Durchschnittstemperatur und zu einer Zunahme von Extremwetterereignissen und Umweltkatastrophen. Hauptursache ist der Ausstoß von Kohlenstoffdioxid durch die Verbrennung fossiler Energieträger. Seit der Pariser UN-Klimakonferenz 2015 gilt das Ziel, die globale Erwärmung auf deutlich unter 2 °C, möglichst 1,5 °C, gegenüber dem vorindustriellen Niveau zu begrenzen [UN15]. Zwischen 2023 und 2024 lagen die globalen Mitteltemperaturen bereits über 1,25 °C über dem vorindustriellen Niveau [RES25; MAT22], und der Weltklimarat prognostiziert ein Überschreiten der 1,5-°C-Schwelle im langfristigen Mittel spätestens um 2028 [CLI22].

Trotz politischer Fortschritte – etwa dem EU-Klimagesetz „Fit for 55“ mit dem Ziel einer 55 %-Reduktion der Treibhausgasemissionen bis 2030 [EUR22] – reichen die nationalen Klimapläne vieler Staaten nicht aus. Laut des Emissions Gap Reports des Umweltprogramms der Vereinten Nationen lassen die bisherigen Zusagen selbst bei vollständiger Umsetzung eine Erwärmung von 2,6 bis 2,9 °C bis 2100 erwarten [OLH24; GUA24]. Das 1,5-°C-Ziel der Pariser Vereinbarung ist somit massiv gefährdet und erfordert ambitionierte, rasche und tiefgreifende Dekarbonisierungsmaßnahmen in allen Sektoren – insbesondere in Energie, Gebäuden und Verkehr. Dazu zählen der beschleunigte Ausbau erneuerbarer Energien, Effizienzsteigerungen (etwa durch verbesserte Gebäudedämmung und leistungsfähigere Wärmepumpen) sowie eine weitergehende Integration von Speichern und Netzoptimierung [CAL23; AL-24; VIC21; IPC22].

Im Stromsektor steht der Übergang von fossilen zu erneuerbaren Energieträgern im Zentrum. In Deutschland ist der Anteil erneuerbarer Energien an der Erzeu-

gung elektrischer Energie von 3,4 % im Jahr 1990 auf 51,8 % im Jahr 2023 gestiegen [UMW24] und wird weiter zunehmen [STI22]. Da diese Energien überwiegend dezentral und volatil erzeugt werden (z. B. PV und Windkraft), schwankt die Zusammensetzung des Elektrizitätsmixes künftig deutlich stärker im Tages- und Jahresverlauf [SEC21]. Damit variieren auch die betrieblichen CO<sub>2</sub>-Emissionen – sowohl im Durchschnitt als auch bei marginalen Emissionsfaktoren, die das jeweils letzte benötigte Kraftwerk widerspiegeln [SEC21]. Parallel steigt der Bedarf an elektrischer Energie, da Gebäude- und Verkehrssektor zunehmend elektrifiziert werden [STI22]. Heizöl und Erdgas werden etwa durch Wärmepumpen ersetzt, fossile Antriebe durch Elektrofahrzeuge.

Im Gebäudesektor verläuft diese Entwicklung bisher langsamer: Der Anteil erneuerbarer Energien am Endenergieverbrauch für Wärme und Kälte stieg von 2,1 % (1990) auf 17,7 % (2023) [UMW24]. Eine Schlüsselrolle spielt die Elektrifizierung durch Wärmepumpen [STI22]. Diese nutzen Umweltwärme und elektrische Energie, um Heizwärme oder Trinkwarmwasser bereitzustellen [QUA23]. Im Neubau haben Wärmepumpen als primäre Heiztechnologie stark an Bedeutung gewonnen: Ihr Anteil stieg von unter 1 % im Jahr 2000 auf über 76 % im Jahr 2023 [BUN24]. Auch im Gebäudebestand wurden 2022 bereits über 20 % der Heizsysteme im Zuge von Sanierungen durch Wärmepumpen ersetzt [BWP23].

Die Nachhaltigkeit solcher Technologien wird mithilfe von Lebenszyklusanalysen (LZA) bewertet, die Rohstoffgewinnung, Transport, Herstellung, Betrieb und Entsorgung umfassen [DIN21b; DIN21c]. Angesichts der langen Lebensdauer von Gebäuden kommt der Betriebsphase hierbei eine besondere Bedeutung zu [SU21]. Entscheidend ist daher die Berücksichtigung der Stromsektordekarbonisierung über die Lebensdauer hinweg. Studien zeigen, dass der Ausbau erneuerbarer Energien allein nicht genügt, um Klimaneutralität zu erreichen. Erforderlich sind zusätzliche Maßnahmen wie Kohleausstieg, Effizienzsteigerungen und ein integrierter europäischer Elektrizitätsmarkt [SEN21; STI22]. Langfristszenarien prognostizieren so einen Anteil erneuerbarer Elektrizitätserzeugung in Deutschland von bis zu 85 % [SEN21; THE24]. Henning et al. [JÜR25] zeigen anhand des REMod-Modells, dass ein 1,5 °C-kompatibles Energiesystem nur durch drastische Maßnahmen erreichbar ist: eine radikale Reduktion des Energieverbrauchs und eine Vervielfachung des Ausbautempos bei PV- und Windkraft.

Mit zunehmender Elektrifizierung im Gebäudesektor – etwa durch Wärmepumpen – gewinnt die Nutzung dynamischer LZA (DLZA) an Bedeutung. Im Gegensatz zu statischen Ansätzen ermöglichen sie eine realitätsnähere Abbildung der prognostizierten Dekarbonisierung des Stromsektors über den gesamten Betrachtungszeitraum [LU23; NIE23]. So zeigen Studien, dass sich der CO<sub>2</sub>-Fußabdruck von elektrischer Energie aus PV über den Lebenszyklus um bis zu 29% reduziert, wenn ein zunehmend erneuerbarer Elektrizitätsmix berücksichtigt wird [LU23]. Projekte wie „Speicher-LCA“ entwickeln hierzu Werkzeuge, um Gebäudeenergiesysteme zukunftsorientiert zu bewerten [NIE23; JÜR25]. Die Literatur verdeutlicht, dass nur sektorübergreifende Dekarbonisierungsstrategien in Kombination mit DLZA-Methoden eine tragfähige Grundlage für klimaoptimierte Systementscheidungen schaffen [HOS24].

## 1.2. Problemstellung

Für die Anwendung der LZA im Gebäude- und Quartierskontext werden in der Regel die Normen DIN EN ISO 14040 [DIN21b], DIN EN ISO 14044 [DIN21b] sowie speziell für Gebäude die Norm DIN EN 15978 [DIN24b] herangezogen. Diese Ansätze beruhen auf Durchschnittswerten für Energie- und Materialflüsse über den gesamten Lebenszyklus und blenden zeitliche Veränderungen aus [SU21]. So wird etwa ein gemittelter Elektrizitätsmix angesetzt, obwohl sich die Emissionen durch den Ausbau erneuerbarer Energien über Jahrzehnte erheblich verändern [NEG19; SU21].

Zur Bewertung elektrischer Energie lassen sich durchschnittliche Emissionsfaktoren (DEF) und marginale Emissionsfaktoren (MEF) unterscheiden. DEF spiegeln die mittleren Emissionen je Kilowattstunde des gesamten Elektrizitätsmixes wider, während MEF die zusätzlichen Emissionen des Grenzkraftwerks abbilden, das bei einer Erhöhung oder Senkung des Verbrauchs reagiert [SEC21; CLU14]. Werden solche zeitabhängigen Größen berücksichtigt, spricht man von einer DLZA [SOH20; NEG19; SU21]. Neben Emissionen können dabei auch Ressourcen- und Primärenergieflüsse dynamisch modelliert werden [WIL14; BIL24].

Primärenergiefaktoren (PEF) quantifizieren das Verhältnis von End- zu Primärenergie und sind zentrale Kenngrößen der energetischen Gebäudebilanzierung

(z. B. im GEG) [BIL24; EUR16]. Bisher werden meist statische PEF verwendet (z. B. Anlage 4 GEG [BMW23]), die kurzfristige Schwankungen des Elektrizitätsmixes oder den wachsenden Anteil erneuerbarer Energien nicht abbilden. Dynamische PEF berücksichtigen hingegen den zeitabhängigen Energiemix und machen so auch Flexibilitätsoptionen wie Speicher oder Lastverschiebungen sichtbar [WIL14; BIL24]. Modelle von Wilby et al. [WIL14] und Han et al. [HAN22] zeigen, dass dynamische Faktoren die Bewertung von Effizienzmaßnahmen deutlich realistischer machen. Daher fordert die überarbeitete EU-Gebäuderichtlinie (2024) explizit die Nutzung „regelmäßig aktualisierter und vorausschauender PEF je Energieträger“ [EUR24]. Die Einführung solcher Methoden setzt jedoch verlässliche Daten (z. B. stündliche Elektrizitätsprofile), angepasste Bilanzierungsnormen (z. B. DIN EN 52000ff. oder DIN EN 17423) und geeignete Simulationswerkzeuge voraus [DIN18a; DIN21a; BIL24].

Mögliche variable Faktoren einer DLZA im Gebäudekontext sind [NEG19; SU21]:

- Veränderungen im Stromsektor,
- Nutzung von Klimaszenarien und Wetterdaten,
- altersbedingte Degradation von Materialien und Systemen,
- technischer Fortschritt,
- End-of-Life-Szenarien (Recycling, Wiederverwendung, Downcycling),
- Änderungen in der Gebäudenutzung.

Diese Aspekte sind bislang nur unzureichend erforscht. Im Rahmen dieser Arbeit werden daher ausgewählte Faktoren vertieft untersucht.

### **1.3. Forschungshypothesen**

Aus der zuvor beschriebenen Problemstellung ergibt sich, dass bestehende LZA-Methoden für Gebäude und Quartiere wichtige dynamische Einflussfaktoren bislang nur unzureichend berücksichtigen. Insbesondere die Dekarbonisierung des Stromsektors, die zeitliche Auflösung von Emissionsdaten, klimatische Veränderungen sowie Material- und Technikdegradation stellen zentrale Unsicherheiten dar, die sich auf die Bewertung energetischer Maßnahmen und die optimale Dimensionierung von Gebäudekomponenten auswirken. Daraus werden im Folgen-

den sechs Haupthypothesen und zwei Zusatzhypothesen abgeleitet.

Die Haupthypothesen lauten:

- H1 Die Dekarbonisierung des Stromsektors verändert die LZA-basierte Dimensionierung der Dämmstärke von Gebäuden mit elektrisch betriebene Wärmepumpensystemen.
- H2 Die Berücksichtigung von Stromsektordaten in stündlicher Auflösung erlaubt die Dimensionierung von thermischen und elektrischen Speichern.
- H3 Die Berücksichtigung von marginalen Stromsektordaten hat einen signifikanten Einfluss auf die Bewertung der Dämmstärken.
- H4 Der Einfluss von Wetterdaten, welche den Klimawandel berücksichtigen, auf die Emissionen und die Dämmstärke ist zu vernachlässigen gegenüber dem Einfluss der Dekarbonisierung des Stromsektors.
- H5 Die Degradation der Gebäudetechnik und Dämmung über die Lebensdauer des Gebäudes haben einen signifikanten Einfluss auf die Auswahl der Dämmstärke.
- H6 Die Berücksichtigung des Recyclingpotentials hat einen geringen Einfluss auf die Bewertung der Gebäudetechnik und der Dämmstärke sowie der betrachteten Emissionen als der Einfluss der Dekarbonisierung des Stromsektors.

Die Zusatzhypothesen lauten:

- Z1 Die Gültigkeit der in den Haupthypothesen formulierten Zusammenhänge ist nicht vom Gebäudetyp abhängig.
- Z2 Auch für Quartiere sind die Haupthypothesen H1 und H2 gültig.

## 1.4. Abgrenzung

Eine LZA nach ISO 14040 umfasst vier Phasen: die Definition des Ziels und des Untersuchungsrahmens, die Sachbilanz, die Wirkungsabschätzung und die Auswertung (siehe Abbildung 2.1) [DIN21b]. Alle vier Phasen können dynamisch betrachtet werden [SOH20]. So kann sich beispielsweise die Systemgrenze im Laufe des Betrachtungszeitraums ändern und sich somit ein dynamischer Untersuchungsrahmen ergeben [ØST18]. Auch in der Wirkungsabschätzung können

sich Charakterisierungsfaktoren verändern, etwa durch die Dekarbonisierung des Stromsektors. In der Auswertung schließlich können sich Gewichtungsfaktoren zwischen verschiedenen Szenarien über die Zeit ändern [SU17]. Die meisten DLZA mit Gebäudebezug beschränken sich jedoch auf die Phasen Sachbilanz und/oder Wirkungsabschätzung [SOH20]. Im Rahmen dieser Arbeit liegt der Fokus ebenfalls auf diesen beiden Phasen.

Frühere Arbeiten zeigen die methodische Bandbreite dynamischer LZA-Ansätze: So berücksichtigen Su et al. [SU17] zeitliche Veränderungen des Energiemixes und des Nutzerverhaltens, während Mueller et al. [MÜL19] mit einer 15-minütigen Auflösung dynamischer Emissionsfaktoren die Abweichungen gegenüber Jahreswerten quantifizieren. Weitere Studien verdeutlichen den Einfluss marginaler Emissionsfaktoren [ROU16c], von Klimawandelszenarien [ROU16a; RAM19], sowie von Degradationsprozessen [NEG19]. Auch modellbasierte Ansätze, etwa das REMod-Modell des Fraunhofer ISE, zeigen die zentrale Bedeutung der Stromsektordekarbonisierung für die Emissionsentwicklung in allen Sektoren [THE24; JÜR25; ERL18].

Aufbauend auf dieser Literatur wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit eine systematische Untersuchung zentraler dynamischer Einflussfaktoren vorgenommen. Die ausgewählten Kategorien orientieren sich an den Forschungsfragen und Hypothesen (vgl. Kapitel 1.3) und umfassen:

- Dekarbonisierung des Stromsektors:  
Literatur: Zahlreiche Studien zeigen, dass die Dekarbonisierung der größte Einflussfaktor in der DLZA ist und dass ohne ihre Berücksichtigung ökologische Optima systematisch überschätzt werden [HOS24; SU21].  
Abgrenzung: Während frühere Arbeiten diesen Aspekt qualitativ oder in vereinfachten Szenarien berücksichtigen, wird in dieser Arbeit die Dekarbonisierung quantitativ über die gesamte Lebensdauer modelliert und direkt mit der Dimensionierung von Dämmung und Anlagentechnik verknüpft (Hypothese H1).
- Zeitliche Auflösung und Speicherstrategien:  
Literatur: Zahlreiche Studien zeigen, dass die zeitliche Auflösung der Stromsektordaten maßgeblich die Bewertung von Speichern beeinflusst. Während

Jahresmittelwerte intra- und intertägliche Schwankungen vollständig glätten, verdeutlichen u. a. Lou et al. [LOU22], Mueller et al. [MÜL19], Roux et al. [ROU16c] und Vuarnoz et al. [VUA18], dass Speicher nur dann wirksam zur Emissionsminderung beitragen, wenn kurzfristige Variabilität explizit modelliert wird. Werden stündliche Emissionsprofile berücksichtigt, verändert sich die Dimensionierung sowohl thermischer als auch elektrischer Speicher erheblich [BLA21b].

Abgrenzung: Frühere Arbeiten untersuchen diesen Zusammenhang meist nur für einzelne Gebäude, kurze Zeiträume oder isolierte Speicheranwendungen. In dieser Arbeit werden stündlich aufgelöste Emissionsdaten über die gesamte Lebensdauer eingesetzt und ihre Auswirkungen auf die gemeinsame Dimensionierung von Speichern und Gebäudehülle analysiert (Hypothese H2).

- **Marginale Emissionsfaktoren:**

Literatur: Marginale Emissionsfaktoren weichen in vielen Stromsystemen stark von Durchschnittswerten ab. Abweichungen von bis zu 150 % sind dokumentiert [PET22]. Sie stellen damit eine fundamentale methodische Entscheidung dar [SU21].

Abgrenzung: Während frühere Studien den Effekt nur für heutige Stromsysteme oder ausgewählte Jahre betrachten, untersucht diese Arbeit den Lebenszyklus-Einfluss marginaler Emissionsfaktoren auf die optimale Dämmstärke (Hypothese H3).

- **Klimawandelbedingte Wetterveränderungen:**

Literatur: Zahlreiche Studien weisen nach, dass steigende Temperaturen den Heizbedarf senken und den Kühlbedarf erhöhen; insgesamt ist der Effekt aber geringer als die Stromsektordekarbonisierung [SU21; HOS24].

Abgrenzung: Während frühere Arbeiten oft nur Klimaszenarien oder Extremfälle betrachten, wird hier der relative Einfluss von Klimaänderungen systematisch den Stromsektoreffekten gegenübergestellt (Hypothese H4).

- **Degradation von Technik und Materialien:**

Literatur: Alterungsprozesse erhöhen den Energiebedarf und werden als zentrale Unsicherheit in der DLZA diskutiert [NEG19; ELE18].

Abgrenzung: Bisher wurden diese Effekte isoliert betrachtet. Diese Arbeit integriert die Degradation von Dämmung und Anlagentechnik in die Lebens-

zyklusbewertung und bewertet ihren Einfluss relativ zur Stromsektordynamik (Hypothese H5).

- End-of-Life und Recycling:

Literatur: Unterschiedliche Recyclingannahmen können die Ergebnisse um bis zu 20 % verändern, bleiben aber im Vergleich zur Dekarbonisierung meist nachrangig [POT21; WAS13].

Abgrenzung: Während frühere Arbeiten Recycling separat betrachten, wird hier das Recyclingpotenzial explizit in die Optimierung der Dämmstärke eingebunden und seine Bedeutung gegenüber der Stromsektordynamik eingeordnet (Hypothese H6).

Im Unterschied zu bisherigen Studien, die meist nur einzelne dieser Faktoren isoliert betrachtet haben, integriert die vorliegende Arbeit alle genannten Dimensionen systematisch. Zudem erfolgt die Bewertung nicht punktuell für einzelne Jahre, sondern integriert über die gesamte Lebensdauer eines Gebäudes. Damit wird der Einfluss dynamischer Stromsektordaten, Speicherstrategien, Dämmniveaus sowie weiterer relevanter Faktoren auf die ökologische Optimierung von Gebäuden erstmals im Zusammenhang analysiert.

## **1.5. Struktureller Aufbau der Arbeit**

Die Arbeit umfasst sieben Kapitel. Kapitel zwei stellt die für die Untersuchung relevanten theoretischen Grundlagen vor (u. a. LZA, Stromsektor und Optimierung). Kapitel drei gibt einen Überblick über den Stand der Technik zu Gebäudetechnik und Dämmung. Kapitel vier erläutert die verschiedenen Modellansätze zur Prüfung der Forschungshypothesen. Kapitel fünf beschreibt die Bewertungsmethodik. Ziel ist die Minimierung der Treibhausgasemissionen aus Bau und Betrieb exemplarischer Gebäude und Quartiere. Dazu werden die Erstellung der Lastprofile sowie der anschließende Optimierungsprozess dargestellt. Kapitel sechs präsentiert und diskutiert die mit verschiedenen Modellierungsansätzen erzielten Optimierungsergebnisse. Kapitel sieben schließt mit einer Zusammenfassung und einem Ausblick auf offene Forschungshypothesen.

## 2. Grundlagen

Dieses Kapitel vermittelt die theoretischen Grundlagen, die für die nachfolgenden Analysen erforderlich sind. Zunächst wird das Konzept der LZA vorgestellt, einschließlich zentraler Begriffe, Systemgrenzen und Datenquellen im Gebäudekontext.

Darauf aufbauend wird die Entwicklung des Stromsektors betrachtet, mit Fokus auf den Wandel des Energiemixes und die daraus resultierenden ökologischen Implikationen. Anschließend folgen Grundlagen zur energetischen Bewertung von Gebäuden, insbesondere zu Heiz- und Kühllasten, Lastprofilbildung und quartiersbezogenen Gleichzeitigkeiten.

Ein weiterer Abschnitt stellt meteorologische Datengrundlagen vor und ordnet verfügbare Datenquellen für gebäudebezogene Simulationen ein. Darüber hinaus werden grundlegende Konzepte der mathematischen Optimierung erläutert, die für die spätere Dimensionierung energetischer Systeme relevant sind.

Abschließend wird die Sensitivitätsanalyse eingeführt, mit der Unsicherheiten wie klimatische Schwankungen oder Nutzerverhalten systematisch berücksichtigt werden können.

### 2.1. Lebenszyklusanalyse von Gebäuden

Eine LZA, auch Ökobilanz genannt, ist ein systematisches Verfahren zur Bewertung der Umweltauswirkungen eines Produkts, eines Prozesses, einer Dienstleistung oder eines gesamten Systems während seines gesamten Lebenszyklus. Dabei wird der Lebenszyklus in verschiedene Phasen unterteilt, die die Gewinnung von Rohstoffen, die Herstellung, die Nutzungsphase sowie die Entsorgung oder das Recycling umfassen. [WÜH22]

Im Kontext von Gebäuden spielen die Vorstufen wie die Rohstoffbereitstellung und der Bauprozess eine bedeutende Rolle, da sie einen erheblichen Einfluss auf die Umweltbilanz haben. Zudem rücken mit der Nutzungsdauer eines Gebäudes Aspekte wie Energieeffizienz, Wartung und eventuelle Modernisierungen in den

Fokus. [SU21]

Ein zentraler Aspekt ist die DLZA, die über die statische Betrachtung hinausgeht, indem sie zeitliche Veränderungen, wie etwa die Entwicklung der Energieversorgung oder Materialdegradation, mit einbezieht. Dies ermöglicht eine realistischere und zukunftsorientierte Bewertung der Umweltauswirkungen. [SU21]

Die nachfolgenden Unterkapitel beginnen mit den für die LZA von Gebäuden wichtigen Normen und Standards, da diese den Rahmen und die Methodik für die Analyse vorgeben. Danach wird das wichtige Thema der DLZA betrachtet, um die Umweltauswirkungen von Gebäuden in einem langfristigen Kontext zu bewerten. Außerdem werden die für die Arbeit wichtigsten LZA-Datenbanken vorgestellt. Zuletzt wird auf das Wiederverwertungspotenzial in der Lebenszyklusanalyse von Gebäuden eingegangen.

### **2.1.1. Normen**

Die Internationalen Normen, die sich mit LZA von Produkten und Dienstleistungen befassen, sind die DIN EN ISO 14040 [DIN21b] und DIN EN ISO 14044 [DIN21c]. Sie werden zusammen als Standards für Umweltmanagement und -bewertung bezeichnet und legen die Prinzipien und Anforderungen für die Durchführung einer LZA fest. [WÜH22] Eine LZA ist in vier Phasen unterteilt: Ziel- und Untersuchungsrahmen (Festlegung von Zweck und Umfang), Sachbilanz (Erfassung aller relevanten Stoff- und Energieströme), Wirkungsabschätzung (Bewertung der Umweltauswirkungen) und Auswertung (Interpretation und Schlussfolgerungen). Die Abbildung 2.1 veranschaulicht diesen Ablauf, indem sie die vier Phasen in ihrem logischen Zusammenhang darstellt. [DIN21c]

Die DIN EN ISO 14040 umfasst die Grundlagen und den Rahmen für die Durchführung einer LZA. Sie legt die allgemeinen Anforderungen fest, einschließlich der Definition des Untersuchungsziels, des Untersuchungsrahmens, der Systemgrenzen und der funktionellen Einheit. Sie bietet auch Leitlinien für die Datenerfassung, -bewertung und -interpretation. [GRO24; DIN21b]

Die DIN EN ISO 14044 definiert die Anforderungen an den Ablauf einer LZA. Sie beschreibt die verschiedenen Phasen des LZA-Prozesses, einschließlich Zieldefinition, Datenerfassung, Bewertung der Umweltauswirkungen und Interpretation

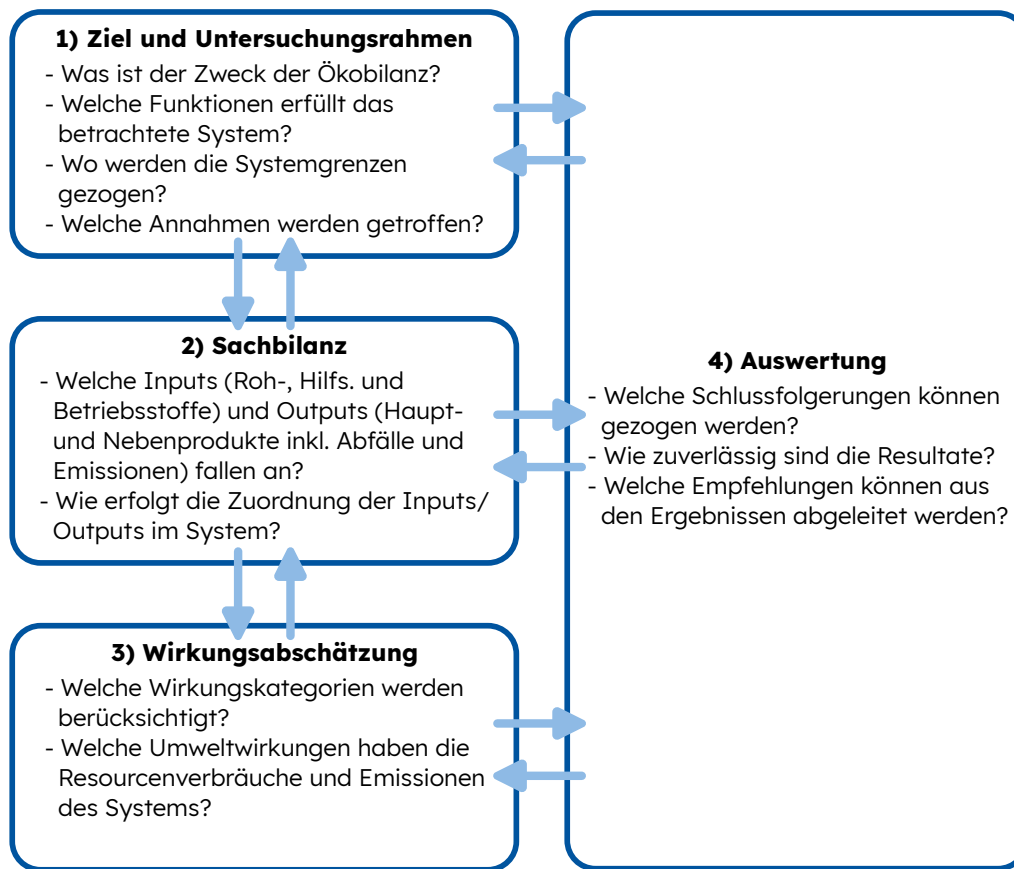


Abbildung 2.1.: Phasen der LZA nach der DIN EN ISO 14040 und Tschiggerl [TSC15; DIN21b]

der Ergebnisse. Die Norm betont die Notwendigkeit der Transparenz, Verifizierbarkeit und Konsistenz der Ergebnisse. [GRO24; DIN21c]

Die Norm DIN EN 15804 definiert die Produktkategorieregeln für Umweltproduktdeklarationen im Bausektor und bildet die Grundlage für eine konsistente Ökobilanzierung von Bauprodukten [DIN24a]. Aufbauend darauf legt die DIN EN 15978 die Methodik zur Bewertung von Gebäuden über den Lebenszyklus fest [DIN12].

Die DIN EN 15978 ist eine europäische Norm [DIN12], die Richtlinien zur Bewertung der Umweltleistung von Gebäuden mit Hilfe der LZA-Methode bereitstellt. Die Norm definiert verschiedene Module und Phasen, die verschiedene Aspekte des Lebenszyklus eines Gebäudes repräsentieren. [GRO24; DIN12]

In der Herstellungs- und Errichtungsphase (Modul A) beginnt der Prozess mit

der Rohstoffbeschaffung (A1), gefolgt vom Transport während der Herstellungsphase (A2) zur Produktionsstätte, wo die Produktion (A3) erfolgt. Anschließend werden die Materialien durch den Transport während der Errichtungsphase (A4) zur Baustelle gebracht und schließlich erfolgt die Errichtung bzw. der Einbau (A5). Während der Nutzungsphase (Modul B) spielen verschiedene Faktoren eine Rolle: die eigentliche Nutzung (B1), Maßnahmen zur Instandhaltung (B2) und Instandsetzung (B3) sowie der Austausch (B4) und die Modernisierung (B5) von Komponenten. Zudem sind der Energieverbrauch im Betrieb (B6) und der Wasserverbrauch im Betrieb (B7) entscheidende Aspekte. Nach der Nutzungsphase folgt die Entsorgungsphase (Modul C), die mit dem Rückbau bzw. Abriss (C1) beginnt. Danach erfolgt der Transport (C2) der Materialien zur Abfallbehandlung (C3) oder zur endgültigen Beseitigung (C4). Schließlich gibt es Vorteile und Belastungen außerhalb der Systemgrenzen (Modul D), insbesondere das Potenzial für Wiederverwertung, Rückgewinnung und Recycling (D). Diese Module sind in Abbildung 2.2 visualisiert.

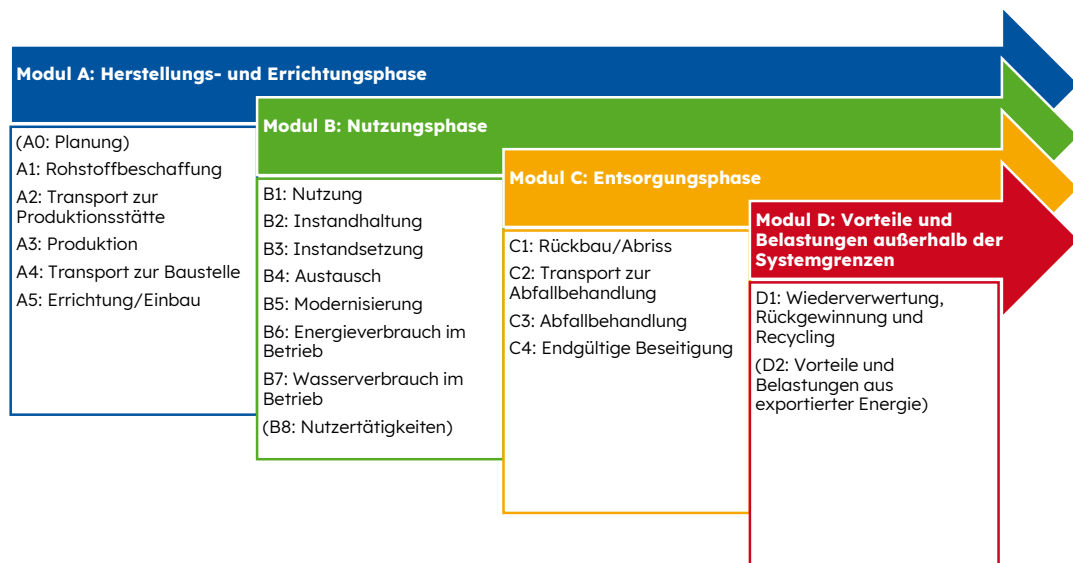


Abbildung 2.2.: Module und Phasen im Lebenszyklus eines Gebäudes nach DIN EN 15978

Nach dem aktuellen Entwurf für eine Neufassung der DIN EN 15978 von 2021 [DIN24b], sollen einige der Module umstrukturiert werden. Dazu kommen sollen ein Modul für die Planung (A0) und ein Modul für gebäudebezogene Nutzer-

tätigkeiten (B8), die nicht durch B1-B7 behandelt werden. Außerdem soll die Phase D aufgeteilt werden in potenzielle Netto-Vorteile aus Wiederverwendung, Recycling, Energierückgewinnung und/oder anderer Rückgewinnung (D1) und potenzielle Vorteile und Belastungen aus exportierter Energie (z.B. elektrische Energie) (D2).

### **2.1.2. Dynamische Lebenszyklusanalyse**

Dynamische LZA (DLZA) bieten eine erweiterte Perspektive, indem sie zeitliche Veränderungen in den Umweltauswirkungen eines Systems berücksichtigen. Sohn et al. [SOH20] haben verschiedene DLZA untersucht, welche nicht nur auf Gebäude beschränkt sind und fünf DLZA Faktoren definiert. Der erste Faktor nutzt einen dynamischen Untersuchungsrahmen, indem sich beispielsweise die Systemgrenze im Laufe des Betrachtungszeitraums ändert. Die dynamischen Faktoren zwei und drei betrachten die Sachbilanz. Zum einen können sich die Prozesse über die Zeit ändern, also zum Beispiel die Effizienz von PV-Modulen abnehmen. Zum anderen kann sich das System an sich ändern, beispielsweise indem die Gebäudebeheizung die ersten 20 Jahre über einen Erdgaskessel und danach über eine Wärmepumpe erfolgt. Ein vierter Dynamikfaktor wirkt in der Phase der Wirkungsabschätzung, da sich die Charakterisierungsfaktoren über die Zeit ändern können. So kann beispielsweise der Einkauf von elektrischer Energie über die Jahre mit weniger Kohlestoffdioxidemissionen verbunden sein. Als fünfter Dynamikfaktor kann sich in der Auswertungsphase die Gewichtung zwischen verschiedenen Szenarien über den Betrachtungszeitraum ändern [SOH20]. Allerdings betrachten die meisten DLZA lediglich die Phasen Sachbilanz und/oder Wirkungsabschätzung [SOH20]. Die im Rahmen der Veröffentlichung von Sohn et al. [SOH20] gefundenen DLZA mit dem Fokus auf ein Gebäude fokussieren sich hauptsächlich auf die dynamische Wirkungsabschätzungen.

Bei der Verwendung von LZA für Gebäude oder Quartiere werden in der Regel die oben genannten Normen angewendet (vgl. Kapitel 2.1.1) Die Anwendung dieser Normen basiert auf Durchschnittswerten für Energie- und Materialflüsse über den gesamten Lebenszyklus. Diese Durchschnittswerte beziehen sich auf die über den Lebenszyklus gemittelten Umweltauswirkungen. Dabei werden zeitliche Veränderungen oder zukünftige Entwicklungen nicht berücksichtigt [SU21].

Ramon et al. [RAM19], Negishi et. al. [NEG19] und Su et. al. [SU21] haben DLZA-Studien und Veröffentlichungen mit dem Fokus auf Gebäude betrachtet. Sie identifizierten wesentliche Faktoren für eine DLZA von Gebäuden. Diese sind:

- Dynamik des Stromsektors und seiner Emissionen
  - Langfristige Entwicklung (Dekarbonisierung)
  - Zeitliche Auflösung (z. B. stündliche Emissionsprofile)
  - Bewertungsansatz (durchschnittliche vs. marginale Emissionen)
- Gebäude- und Materialdynamiken
  - Material- und Systemdegradation (z. B. Alterung von Dämmstoffen oder Effizienzverluste von Wärmepumpen)
  - Technologischer Fortschritt (Ersatz oder Weiterentwicklung von Bau- und Anlagentechnik im Zeitverlauf)
  - Prozesse am Lebensende (z. B. Recyclingpotenziale und Rückbaupraktiken)
- Externe Rahmenbedingungen und Nutzung
  - Klimawandelbedingte Wetterveränderungen (z. B. Temperaturanstieg, Extremwetterereignisse)
  - Veränderung des Nutzerverhaltens (z. B. Haushaltsgröße, Raumnutzung, Lebensstil)

### **2.1.2.1. Dynamik des Stromsektors und seiner Emissionen**

Unter Änderungen im Stromsektor können sowohl kurzfristige Änderungen, also Änderungen von einer Stunde auf die nächste, als auch Änderungen über den Betrachtungszeitraum, wie beispielsweise ein Stromsektor mit einem steigenden Anteil erneuerbarer Energien, verstanden werden. Normalerweise werden über das Jahr und die Lebensdauer konstante Werte für die Interaktion des Gebäude mit dem Stromsektor angesetzt [ITT12; ROU16b]. Diese Werte können jedoch auch als stündlich oder minütlich über das Jahr hinweg variierend betrachtet werden. [MÜL19; ROU16b; ROU16c; ROU16a]. Außerdem ist es möglich, dass sich diese über die Lebensdauer des Gebäudes ändern [MÜL19; ROU16a; NEG19]. Auch eine Kombination aus beiden Ansätzen ist möglich [MÜL19; ROU16b].

Die Dekarbonisierung des Stromsektors stellt einen der zentralen Einflussfaktoren für DLZA im Gebäudebereich dar. Zahlreiche Studien belegen, dass Verände-

rungen im Strommix maßgeblich die ökologischen Ergebnisse prägen. [HOS24; SU21] Ayagapin et al. [AYA21] zeigen am Beispiel einer französischen Insel, dass eine progressive Dekarbonisierung des Stromsektors insbesondere die Nutzungsphase von Gebäuden stark beeinflusst und die Gesamtemissionen über den Lebenszyklus deutlich reduziert. Ähnliche Befunde berichten Vandemoortel et al. [VAN22], die für Wohngebäudesanierungen Unterschiede von bis zu 30 % zwischen einem pessimistischen und einem ambitionierten Dekarbonisierungsszenario identifizieren. Kordilas et al. [KOR25] weisen darüber hinaus darauf hin, dass ein dekarbonisierter Stromsektor zwar die Klimawirkungen reduziert, gleichzeitig aber andere Umweltwirkungen (z. B. Ressourcenverbräuche) an relativer Bedeutung gewinnen, was zu einem neuen „Performance Gap“ zwischen statischen und dynamischen Betrachtungen führt. Auch in Review-Studien wird die zentrale Rolle der Stromsektordynamik hervorgehoben. Hosamo et al. [HOS24] bezeichnen den sich wandelnden Strommix als eine der größten Unsicherheitsquellen in der DLZA, während Su et al. [SU21] die Berücksichtigung zeitvariabler Stromsektordaten als eine der Schlüsselvariablen klassifizieren. Ergänzend verdeutlichen Resch et al. [RES21], dass die zeitliche Verteilung von Emissionen im Lebenszyklus entscheidend für die Klimawirkung von Gebäuden ist und durch Dekarbonisierung besonders stark beeinflusst wird. Kiss et al. [KIS22] liefern zudem empirische Hinweise aus einer Optimierungsstudie, dass die Abbildung einer dekarbonisierenden Stromsektorentwicklung die Bewertung von Gebäudesystemen messbar verändert. Damit zeigt die Literatur übereinstimmend, dass ohne die Berücksichtigung einer dekarbonisierenden Entwicklung des Stromsektors die ökologischen Optima von Gebäudehüllen und Anlagentechnik systematisch überschätzt werden können – ein Befund, der die zugrunde liegende Haupthypothese H1 motiviert.

Die Dimensionierung thermischer und elektrischer Speicher hängt wesentlich von der zeitlichen Auflösung der zugrunde gelegten Stromsektordaten ab. Während Jahresmittelwerte intra- und intertägliche Schwankungen vollständig glätten, erlauben stündlich aufgelöste Daten eine realistischere Abbildung der volatilen Emissionsintensität des Stromsektors. [BLA21b] Lou et al. [LOU22] zeigen für Bürogebäude in den USA, dass die Berücksichtigung dynamischer Stromemissionen entscheidend für die Bewertung von Effizienzmaßnahmen und Speicherstrate-

gien ist. Auch Roux et al. [ROU16c; ROU16a] und Müller et al. [MÜL19] verdeutlichen, dass Speicher vor allem dann wirksam zur Emissionsminderung beitragen, wenn die kurzfristige Variabilität des Stromsektors explizit modelliert wird. Ähnlich weisen Maayan-Tardif et al. [MAA21] nach, dass Speicher ihr ökologisches Potenzial nur unter Berücksichtigung stündlich variierender Emissionsfaktoren entfalten können. Vuarnoz et al. [VUA18] kommen zu vergleichbaren Ergebnissen und zeigen, dass sich Speicherstrategien und die Bewertung der Betriebsemissionen erheblich verändern, sobald statt Jahresmittelwerten stündliche Emissionsprofile eingesetzt werden. Blanke et al. [BLA21b] bestätigen dies zudem für die Optimierung von Gebäudeenergiesystemen. Werden dynamische, stündliche Emissionsfaktoren für den Stromsektor berücksichtigt, verändert sich die optimale Dimensionierung von Gebäudekomponenten deutlich – insbesondere steigt die ökologisch sinnvolle Batteriekapazität stark an, während sie bei statischen Ansätzen kaum gerechtfertigt erscheint [BLA21b]. Su et al. [SU21] ordnen daher die zeitliche Auflösung des Energiemixes als zentrale Variable DLZA ein. Diese Erkenntnisse stützen die Haupthypothese H2, wonach nur stündlich aufgelöste Stromsektordaten eine belastbare Dimensionierung thermischer und elektrischer Speicher ermöglichen.

Marginale Emissionsfaktoren erfassen die Emissionen des jeweils letzten, zur Deckung einer zusätzlichen Nachfrage eingesetzten Kraftwerks. Sie unterscheiden sich methodisch von durchschnittlichen Emissionsfaktoren, die den gemittelten Energiemix aller aktuell betriebenen Kraftwerke abbilden. Insbesondere in Stromsystemen mit fossilen Spitzenlastkraftwerken können marginale Werte deutlich von Durchschnittswerten abweichen. [HOS24] Siler-Evans et al. [SIL12] zeigen für den US-Strommix, dass marginale CO<sub>2</sub>-Faktoren regional bis zu 70 % über den Durchschnittswerten liegen können, während Sensitivitäten für SO<sub>2</sub> sogar ein Vielfaches betragen. Peters et al. [PET22] stellen stunden- und monatsgenaue marginale Strommix-Daten für Spanien bereit und veranschaulichen Abweichungen von bis zu 150 % gegenüber den Durchschnittswerten, insbesondere in Systemen mit stark variabler Nachfrage wie Speichern oder PV-Anlagen. Review-Studien betonen, dass die Wahl zwischen durchschnittlichen und marginalen Emissionsfaktoren eine fundamentale methodische Entscheidung in DLZA darstellt [SU21] und zugleich erhebliche Unsicherheiten birgt, da die Werte stark

von Systemcharakteristika und zeitlicher Variabilität abhängen [HOS24]. Vor diesem Hintergrund adressiert die Haupthypothese H3 die Frage, in welchem Umfang die Berücksichtigung marginaler Stromsektordaten die Bewertung ökologisch optimaler Dämmstärken beeinflusst.

### **2.1.2.2. Gebäude- und Materialdynamiken**

Die Effizienzverluste von Gebäudetechnik und Dämmstoffen über die Lebensdauer stellen einen weiteren dynamischen Faktor in der LZA dar. Negishi et al. [NEG19] und Su et al. [SU21] zeigen, dass die Alterung von Materialien und technischen Anlagen zu einer signifikanten Erhöhung des Energiebedarfs führen kann. Typische Beispiele sind die zunehmende Wärmeleitfähigkeit von Dämmstoffen oder die sinkende Leistungszahl von Wärmepumpen. Eine Fallstudie von Eleftheriadis et al. [ELE18] verdeutlicht zudem, dass sowohl die Verschlechterung der Dämmwirkung als auch die Degradation von Heizungs- und Kühlsystemen einen messbaren Einfluss auf die Gesamtenergieperformance von Gebäuden haben. Hosamo et al. [HOS24] klassifizieren Material- und Systemdegradation daher als eine der zentralen Unsicherheiten in DLZA, da sie über Jahrzehnte hinweg kumulative Effekte erzeugt. Auch wenn die Größenordnung meist geringer ist als die Effekte der Stromsektordekarbonisierung, bestätigen die Befunde, dass Degradation kein relevanter Einflussfaktor für die Auswahl ökologisch optimaler Dämmstärken ist – wie in Hypothese H5 formuliert.

Neben der Verschlechterung der eingebauten Materialien und Energiesysteme können sich auch neue Technologien entwickeln oder weiterentwickeln und sich deren Effizienz verbessern [SU21; NEG19; RAM19]. Somit könnte beispielsweise eine Wärmepumpe am Ende ihrer Lebensdauer durch eine in Zukunft effizientere ausgetauscht werden. Aber auch die Art und Weise, wie Produkte wiederverwertet werden, kann sich in Zukunft verbessern [NEG19]. Diese Entwicklungen abzuschätzen ist eine komplexe Aufgabe [SU21].

Das Verhalten am Lebensende von Baustoffen und Gebäudetechnik ist hochgradig unsicher, da Recyclingtechnologien und Rückbaupraktiken einem starken Wandel unterliegen [HOS24]. Potrč Obrecht et al. [POT21] zeigen, dass unterschiedliche Annahmen zur Recyclingquote zu Abweichungen von bis zu 20 % in den verkörperten Emissionen führen können. Auch eine Fallstudie von Wastiels

et al. [WAS13] verdeutlicht die Relevanz des Recyclingpotenzials (Modul D) für die Bewertung von Sanierungsmaßnahmen und zeigt, dass unterschiedliche Annahmen für das Lebensende zu signifikanten Unterschieden in der Gesamtbilanz führen können. Hosamo et al. [HOS24] verweisen darauf, dass die Unsicherheit zukünftiger Recyclingraten eine wesentliche Herausforderung für DLZA darstellt. Gleichzeitig weisen die meisten Studien darauf hin, dass der Einfluss des Recyclingpotenzials auf die Gesamtergebnisse im Vergleich zur Dekarbonisierung des Stromsektors nachrangig bleibt [NEG19; SU21]. Hypothese H6, wonach der Effekt des Recyclings zwar messbar, aber weniger bedeutsam ist als die Stromsektordynamik, wird damit gestützt.

### **2.1.2.3. Externe Rahmenbedingungen und Nutzung**

Klimawandelbedingte Veränderungen der Wetterverläufe beeinflussen sowohl den Heiz- und Kühlbedarf von Gebäuden als auch den Ertrag erneuerbarer Energien. [SU21] Mehrere Studien zeigen, dass langfristig steigende Temperaturen den Heizwärmebedarf senken, gleichzeitig jedoch den Kühlbedarf erhöhen können [RAM19; WIL12]. Kordilas et al. [KOR25] sowie Resch et al. [RES21] betonen, dass die Integration von Klimaszenarien in Gebäudesimulationen notwendig ist, um künftige Energiebedarfe realistisch abzubilden. Auch Kiss et al. [KIS22] verdeutlichen im Rahmen einer Optimierungsstudie, dass die Berücksichtigung klimatischer Veränderungen die Bewertung einzelner Maßnahmen zwar beeinflusst, der Effekt jedoch im Vergleich zur Entwicklung des Stromsektors nachrangig bleibt. Review Studien bestätigen diesen Befund. Die Effekte wetterbedingter Veränderungen fallen in der Regel geringer aus als die Einflüsse der Stromsektordekarbonisierung [SU21; HOS24]. Damit wird die Annahme der Haupthypothese H4 gestützt, dass Wettereinflüsse zwar messbar sind, im Vergleich zur Stromsektordynamik jedoch eine nachrangige Rolle spielen.

Von allen dynamischen Einflussfaktoren gilt das Nutzerverhalten als am schwersten prognostizierbar, da es sich im Laufe der Lebensdauer eines Gebäudes durch demografische, sozioökonomische oder verhaltensbezogene Veränderungen stark wandeln kann [NEG19; SU21]. Typische Beispiele sind veränderte Haushaltsgrößen, Anpassungen der Raumnutzung oder neue Arbeits- und Lebensstile wie vermehrtes Arbeiten von zu Hause [GUE11; MAN24b]. Forschungsergebnisse

verdeutlichen zudem, dass Nutzerverhalten eine zentrale Ursache für die Diskrepanz zwischen simulierten und realen Energieverbräuchen darstellt [MAR20]. Zur Abbildung dieser Unsicherheiten wurden verschiedene Ansätze entwickelt, wie beispielsweise stochastische und agentenbasierte Modelle [HOE09; CAR20], sowie datengetriebene Verfahren, die auf empirischen Nutzungsprofilen und Methoden des maschinellen Lernens beruhen [HEY20; DON22; MAR20]. Obwohl diese Ansätze detaillierte Einblicke in Präsenz, Verhalten und Energieverbrauch ermöglichen, bleibt die langfristige Entwicklung des Nutzerverhaltens eine wesentliche Herausforderung für dynamische Gebäudesimulationen.

#### **2.1.2.4. Zusammenfassung des Forschungsstandes**

Zur weiteren Einordnung des Forschungsstandes wurde eine vergleichende Analyse ausgewählter Studien vorgenommen. Dabei wird überprüft, welche dynamischen Einflussfaktoren in den jeweiligen Arbeiten berücksichtigt werden und wie breit die methodische Abdeckung ist. Die ausgewählten Kategorien orientieren sich an den in dieser Arbeit untersuchten Hypothesen (vgl. Kapitel 1.3) und umfassen die Aspekte Dekarbonisierung des Stromsektors, zeitliche Auflösung (stündlich), Berücksichtigung von Speichern oder Dämmung, marginale Emissionen, Wettereinflüsse, Degradationsprozesse sowie Recyclingpotenziale. Tabelle 2.1 fasst die Ergebnisse dieser Analyse zusammen.

Review-Studien verdeutlichen ebenfalls die bestehenden methodischen Lücken. Su et al. [SU21] klassifizieren die zeitliche Auflösung des Energiemixes, die Behandlung marginaler Emissionen sowie den Umgang mit Degradation und Recycling als zentrale Variablen einer DLZA, stellt jedoch fest, dass bislang keine einheitlichen methodischen Standards existieren. Hosamo et al. [HOS24] heben insbesondere die Unsicherheiten hervor, die durch die Dynamik des Stromsektors, klimatische Veränderungen und Materialdegradation entstehen, und zeigen auf, dass diese Faktoren in vielen Studien nur unvollständig berücksichtigt werden. Beide Reviews machen deutlich, dass die bisherige Forschung zwar vielfältige Ansätze entwickelt hat, eine kohärente Integration mehrerer dynamischer Einflussgrößen über die gesamte Lebensdauer von Gebäuden jedoch weitgehend fehlt.

Die Auswertung zeigt, dass zwar zahlreiche Studien zeitliche Variabilität im elek-

Tabelle 2.1.: Abgedeckte dynamische Einflussfaktoren in ausgewählten DLZA-Studien im Gebäudekontext (x = berücksichtigt, - = nicht berücksichtigt)

Studie / Quelle	Dekarb.	Stündl. Aufl.	Speicher	Dämmung	Marginale Emis.	Wetter	Degrad.	Recycling
Ayagapin et al. [AYA21]	x	-	-	-	-	-	-	-
Vandemoortel et al. [VAN22]	x	-	-	x	-	-	-	-
Kordilas et al. [KOR25]	x	-	-	-	-	x	-	-
Resch et al. [RES21]	x	-	-	x	-	x	-	-
Kiss et al. [KIS22]	x	-	-	x	-	x	-	-
Lou et al. [LOU22]	-	x	x	-	-	-	-	-
Roux et al. [ROU16c; ROU16a]	-	x	x	-	-	-	-	-
Mueller et al. [MÜL19]	x	x	x	-	-	-	-	-
MaayanTardif et al. [MAA21]	-	x	x	-	-	-	-	-
Vuarnoz et al. [VUA18]	-	x	x	-	-	-	-	-
SilerEvans et al. [SIL12]	-	x	-	-	x	-	-	-
Peters et al. [PET22]	-	x	x	-	x	-	-	-
Ramon et al. [RAM19]	-	-	-	-	-	x	-	-
Williams et al. [WIL12]	-	-	-	-	-	x	-	-
Negishi et al. [NEG19]	-	-	-	-	-	-	x	x
Eleftheriadis et al. [ELE18]	-	-	-	-	-	-	x	-
PotrcObrecht et al. [POT21]	-	-	-	-	-	-	-	x
Wastiels et al. [WAS13]	-	-	-	-	-	-	-	x
Hosamo et al. [HOS24]	x	x	x	x	x	x	x	x
Su et al. [SU21]	x	x	x	x	x	x	x	x

trischen Energiemix berücksichtigen, dies jedoch meist nur selektiv geschieht – etwa durch stundenweise Betrachtungen innerhalb einzelner Jahre. Eine durchgängige Integration dynamischer Strommix-Daten über die gesamte Lebensdauer von Gebäuden ist dagegen selten. Selbst in Arbeiten, die explizit dynamische Lebensdauerereffekte untersuchen, fehlt bislang ein standardisiertes methodisches Vorgehen, das breit anerkannt oder normativ verankert wäre. Diese Forschungslücke motiviert die in dieser Arbeit formulierten Hypothesen (vgl. Kapitel 1.3), die gezielt die Effekte von Dekarbonisierung, stündlicher Auflösung, marginalen Emissionen, Wetterveränderungen, Degradation und Recyclingpotenzialen auf die ökologische Bewertung von Gebäuden adressieren.“

### 2.1.3. Lebenszyklusanalysedatenbanken

LZA-Datenbanken sind essenzielle Werkzeuge für die Durchführung von LZA, da sie standardisierte, geprüfte und umfassende Daten zu den Umweltauswirkungen von Produkten, Materialien und Prozessen bereitstellen [GRO24]. Sie ermöglichen eine effiziente und konsistente Bewertung der ökologischen Aspekte eines Produkts oder einer Dienstleistung über den gesamten Lebenszyklus hinweg [GRO24].



Abbildung 2.3.: Open-LCA-Datenbanken [GRE24a]

Die Abbildung 2.3 zeigt eine Auswahl an verschiedenen LZA -Datenbanken. Daraus wird ersichtlich, dass es eine Vielzahl unterschiedlichster Datenbanken gibt, die sich hinsichtlich ihrer Zielsetzung, Datenstruktur, geografischen Abdeckung und Aktualität deutlich unterscheiden. Einige sind generelle Datenbanken, wie Ecoinvent oder GaBi, die ein breites Spektrum an Prozessen aus verschiedenen Sektoren (Industrie, Energie, Transport, Landwirtschaft etc.) abbilden. Andere hingegen sind auf spezielle Anwendungsfälle zugeschnitten – z. B. die Bioenergie dat für die energetische Nutzung von Biomasse oder die ÖKOBAUDAT speziell für den Bausektor.

Die folgende Tabelle bietet eine wissenschaftliche Gegenüberstellung zentraler LZA -Datenbanken:

Tabelle 2.2.: Gegenüberstellung ausgewählter LZA-datenbanken

<b>Datenbank</b>	<b>Fokusbereich</b>	<b>Geografische Bezug</b>	<b>Verfügbarkeit</b>	<b>Spezifische Stärken</b>
Ecoinvent	Allgemeine Prozesse, Energie, Transport, Industrie	Global	Kommerziell	Sehr detailliert, standardisierte Systemmodelle
GaBi	Industrie, Energie, Transport	Global	Kommerziell	Umfangreiche Industrieschnittstellen
ÖKOBAUDAT	Bauprodukte, Gebäude	Deutschland	Frei zugänglich	Baustoffspezifisch, öffentlich zugänglich
Bioenergiedat	Bioenergie, Biomassenutzung	Deutschland	Frei zugänglich	Energiepflanzen, Biogasanlagen etc.

Im Rahmen dieser Arbeit werden die Ecoinvent-Datenbank, als größte und weltweit verbreitetste kommerzielle Datenbank [TEC24; BV24], sowie die ÖKOBAUDAT, als wichtigste deutsche Datenbank für den Gebäudesektor, näher vorgestellt.

Im internationalen Kontext gilt Ecoinvent als die am weitesten verbreitete und detaillierteste LZA-Datenbank. Sie bildet eine breite Palette von Prozessen und Sektoren ab und wird in einer Vielzahl wissenschaftlicher Studien als Referenz eingesetzt. Allerdings sind die dort enthaltenen Datensätze in der Regel auf Jahresmittelwerte bezogen und für generische Anwendungen konzipiert, sodass sie für den Gebäudebereich nur eingeschränkt normativ nutzbar sind. [ECO23]

Für den deutschen Bausektor nimmt dagegen die ÖKOBAUDAT eine zentrale Rolle ein. Sie ist die einzige durch das Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen bereitgestellte und frei zugängliche Datenbank, die explizit auf Bauprodukte und Gebäude zugeschnitten ist. Ihre Datensätze sind konform mit der DIN EN 15804 [DIN24a] und werden in Nachweisen nach DIN EN 15978

[DIN24b] sowie in Bewertungssystemen wie die der Deutschen Gesellschaft für nachhaltiges Bauen verpflichtend gefordert. Zudem bietet ÖKOBAUDAT neben aktuellen Durchschnittswerten teilweise auch projizierte Datensätze für Zukunftsjahre (z.,B. 2030 oder 2045), die auf Klimaschutzszenarien des Umweltbundesamtes basieren. [BBS23]

Damit ergänzen sich beide Datenbanken. Während Ecoinvent eine international vergleichbare Grundlage mit hoher Prozessdetaillierung liefert, stellt ÖKOBAUDAT die normenkonforme und anwendungsorientierte Datenbasis für gebäude-spezifische Bewertungen in Deutschland dar.

Für DLZA mit stundengenauer Abbildung des elektrischen Energiemixes sind zusätzliche Tools oder Datenquellen erforderlich, wie nationale Elektrizitätsmarktmodelle. Deswegen werden im Kapitel 2.2 Studien zum deutschen Stromsektor vorgestellt.

#### **2.1.4. Wiederverwertungspotenzial in der Lebenszyklusanalyse von Gebäuden**

Das Wiederverwertungspotenzial von Baustoffen und -komponenten stellt einen wichtigen Aspekt in der LZA von Gebäuden dar. Es bezieht sich auf die Möglichkeit, Materialien nach dem Rückbau eines Gebäudes erneut zu verwenden, zu recyceln oder energetisch zu verwerten. Die Berücksichtigung dieses Potenzials soll eine umfassendere und realistischere Darstellung der Umweltauswirkungen eines Gebäudes über seinen gesamten Lebenszyklus hinweg ermöglichen, insbesondere in der Phase der Bewertung am Lebensende (Modul D, vgl. Kapitel 2.1.1). [DIN24b]

In der Theorie kann die Wiederverwertung von Baumaterialien signifikant zur Reduzierung von Treibhausgasemissionen und Ressourcennutzung beitragen. Laut Hafner et al. [HAF17] kann durch konsequente Wiederverwendung und Recycling von Baustoffen der Primärrohstoffbedarf über 35 % gesenkt werden. Zudem können sogenannte „Recyclinggutschriften“ in der LZA einen Teil der Umweltauswirkungen kompensieren, die in früheren Lebenszyklusphasen angefallen sind.

Trotz des hohen theoretischen Potenzials wird das Wiederverwertungspotenzial in der Praxis nur selten ausgeschöpft. Dies hat mehrere Gründe:

- Technische und stoffliche Hürden:  
Viele Baustoffe sind heute nicht sortenrein rückbaubar oder durch Verklebung, Vermischung oder Alterung nur schwer wiederverwendbar. Verbundwerkstoffe (z. B. Wärmedämmverbundsysteme) lassen sich kaum trennen und verlieren im Rückbauprozess oft an Qualität. [DEC22]
- Fehlende Rückbau- und Recyclinginfrastruktur:  
Der selektive Rückbau ist technisch aufwendig, kostenintensiv und erfordert spezialisierte Unternehmen sowie eine detaillierte Dokumentation der Gebäudesubstanz. Nach der novellierten GewAbfV besteht zudem die Pflicht, die Bau- und Abbruchabfall-Fraktionen (z. B. Glas, Metalle, Holz, Beton, Ziegel) getrennt zu erfassen und vorrangig dem Recycling oder der Wiederverwendung zuzuführen. Ausnahmen gelten nur, wenn eine Getrenntsammlung technisch unmöglich oder wirtschaftlich unzumutbar ist. Da eine flächendeckende Infrastruktur für hochwertige Sortierung und Aufbereitung bislang weitgehend fehlt, bleibt die Umsetzung in der Praxis schwierig. [BUN22; KNA23; WEI13]
- Mangelnde Planungsintegration:  
In der Planungsphase werden Wiederverwendungsaspekte selten berücksichtigt. Das sogenannte „Design for Disassembly“ ist in der Baupraxis noch kaum verbreitet. [DUR18; DEC22]
- Regulatorische Hemmnisse und Haftungsfragen:  
Für viele Bauprodukte aus dem Rückbau bestehen nach wie vor Unsicherheiten bei Qualitätssicherung, Zulassung und Haftung. Zwar existieren inzwischen spezifische Regelwerke wie die Ersatzbaustoffverordnung [BUN23], die den Wiedereinsatz insbesondere im Erd- und Straßenbau regeln, hierbei handelt es sich jedoch meist um Downcycling (z. B. Einsatz von Betonbruch als Schotter) und nicht um hochwertiges Recycling. Für Bauprodukte im Hochbau sind die rechtlichen Rahmenbedingungen nach wie vor deutlich restriktiver. [ABE21]
- Wirtschaftliche Faktoren:  
Neue Baustoffe sind häufig billiger als rückgewonnene, insbesondere wenn externe Umweltkosten nicht in die Preisbildung einfließen. Das senkt die Marktakzeptanz für Sekundärbaustoffe. [NUS20]

## 2.2. Studien zum Stromsektor

Studien zur zukünftigen Entwicklung des Stromsektors liegen zahlreich vor. Die Stiftung Klimaneutralität hat eine Auswahl von fünf Studien getroffen, die sie als besonders relevant für die Transformation des deutschen Energiesystems einstuft [STI22]. Diese Auswahl basiert auf Kriterien wie Bekanntheit, politischem Einfluss sowie methodischer Breite der betrachteten Szenarien. Auch andere Arbeiten im wissenschaftlichen und politischen Raum greifen wiederholt auf dieselben oder ähnliche Studien zurück (z. B. [ZER22; WIE21]). Daher wird im Rahmen dieser Arbeit repräsentativ für viele andere auf diese fünf Studien eingegangen. Die fünf Studien sind in Tabelle 2.3 gegenübergestellt und werden im nachfolgenden Kapitel näher erläutert.

Tabelle 2.3.: Überblick zentraler Klimaneutralitätsstudien für Deutschland

<b>Studie</b>	<b>Trägerschaft</b>	<b>Fokus</b>	<b>Zeithorizont</b>	<b>Quelle</b>
Klimaneutrales Deutschland 2045 (KNDE2045)	Prognos, Öko-Institut, Wuppertal-Institut	Gesamt-Systempfad, sektorübergreifende Emissionsminderung	2045	[PRO21]
Klimapfade 2.0 – Ein Wirtschaftsprogramm für Klima und Zukunft (KP 2.0)	Boston Consulting Group, Bundesverband der Deutschen Industrie	Industrie- und wirtschaftsorientierte Transformation mit sektoralen Maßnahmen	2030 und 2045	[BCG21]
Aufbruch Klimaneutralität (KN100)	Deutsche Energie-Agentur (dena)	Politisch-strategische Empfehlungen zur Energiewende und Dekarbonisierung	2045	[DEN21]
Langfristszenario für die Transformation des Energiesystems (LFS)	Consentec, Fraunhofer ISI, TU Berlin, Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg	Energie- und Infrastrukturanalyse mit Szenarien zur Sektorkopplung	2050	[SEN21]
Deutschland auf dem Weg zur Klimaneutralität 2045 (Ariadne)	Ariadne-Konsortium (u. a. MCC, PIK, DLR, RWI)	Politikpfade, sektorale Roadmaps, internationale Einflüsse	2045	[LUD21]

### 2.2.1. Die großen fünf Stromsektorstudien

Abbildung 2.4 zeigt die Entwicklung der Nettostromerzeugung für die verschiedenen Studien. Aus der Grafik wird ersichtlich, dass sich sowohl die benötigte Gesamtenergiemenge als auch die benötigten erneuerbaren Energiequellen sowie die Nutzung von importiertem oder selbst hergestelltem Wasserstoff unterscheiden. Auf die Unterschiede wird folgend genauer eingegangen.

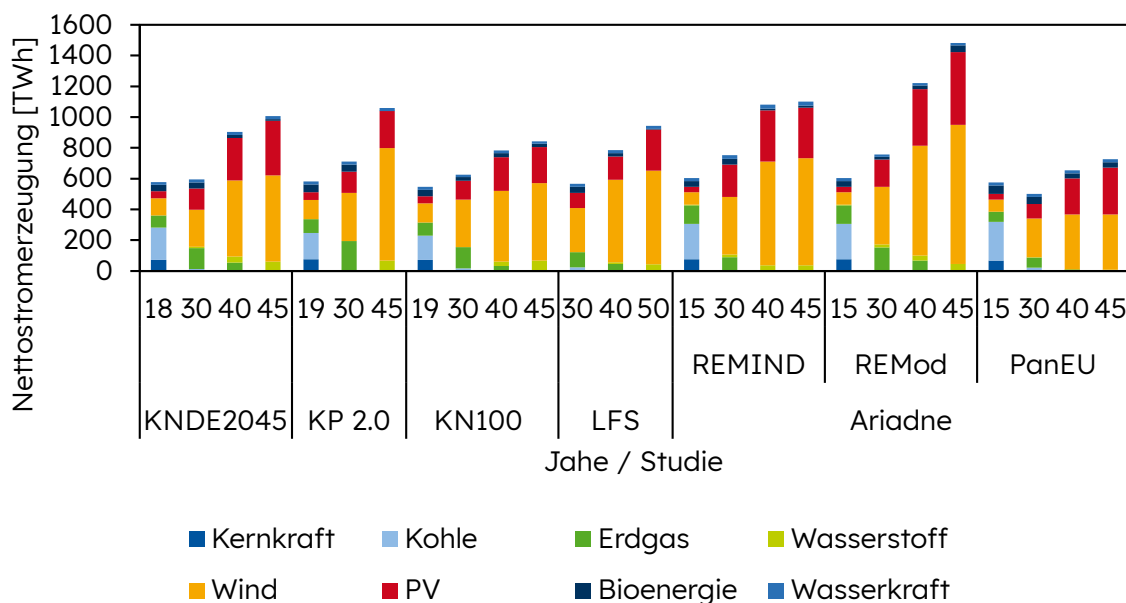


Abbildung 2.4.: Notwendige Nettostromerzeugung für die großen fünf Stromsektorstudien [STI22]

Die Studie „Klimaneutrales Deutschland 2045“ folgt der Zielsetzung, dass Deutschland durch beschleunigte Nutzung klimafreundlicher Technologien und starker Klimapolitik bis 2045 Klimaneutralität erreicht und danach sogar negative Emissionen erzielt. Es werden keine drastischen Verhaltensänderungen wie Konsumeinschränkungen angenommen, aber Trends wie der Anstieg von Fleisch- und Milchalternativen werden berücksichtigt. Die Auswahl von Maßnahmen basiert vor allem auf Wirtschaftlichkeit und technischer Umsetzbarkeit, wobei Technologien mit geringen Risiken bevorzugt werden. Das Szenario berücksichtigt Emissionen aus allen Sektoren. [STI22]

In der Studie „Klimpfade 2.0“ wird im Energiesektor angenommen, dass Deutschland seine Spitzenlast aus eigener Kraft decken können soll, was die benötigte gesicherte Leistung vor allem von Erdgas- und Wasserstoffkraftwerken erhöht. Im Verkehrssektor ist der Wechsel zu elektrischen Antrieben für PKW, leichte und schwere Nutzfahrzeuge entscheidend, aber auch eine Beimischung von grünen Kraftstoffen wird berücksichtigt. Für den Straßenverkehr werden bis 2030 etwa 3 Millionen Tonnen synthetischer Kraftstoffimporte benötigt, die später für den internationalen Verkehr zur Verfügung stehen sollen. Im Gebäudesektor

tor ist bis 2030 ein Umstieg auf Umweltwärme und elektrische Energie außerhalb urbaner Gebiete vorgesehen, wobei Wärmepumpen eine bedeutende Rolle spielen sollen, und eine Sanierung des Wohnbestands auf ein Effizienzniveau von  $70 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \text{ a})$  angestrebt wird, was eine Halbierung des Energieverbrauchs im Durchschnitt bedeutet. Auch hier werden alle Sektoren betrachtet. [STI22]

Im Rahmen der dena Leitstudie „Aufbruch Klimaneutralität“ wurde das Szenario „Klimaneutralität 100“ (KN100) entworfen, das eine umfassende Transformation der Endverbrauchssektoren und des Energiesystems in Deutschland und Europa beschreibt. Dies erfolgte unter Berücksichtigung aktueller wissenschaftlicher Erkenntnisse, Innovationsprozesse und gesellschaftlicher Entwicklungen. Die Studie integrierte Bottom-up-Modelle für Industrie, Verkehr und Gebäude sowie das EWI Energiesystemmodell DIMENSION für den Umwandlungssektor. Ein zentrales Merkmal war der Dialog mit verschiedenen gesellschaftlichen Akteuren und Branchenexperten, um eine fundierte Grundlage für den Diskurs zur Klimaneutralität zu schaffen. KN100 richtet sich am Klimaschutzgesetz 2021 aus und strebt sowohl sektorspezifische als auch sektorübergreifende Emissionsziele an. Es wird eine Emissionsminderung von 55 % bis 2030 und Klimaneutralität bis 2050 angestrebt. [STI22]

In der Studie „Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland 3“ wird untersucht, welche Auswirkungen verschiedene Wege zur Dekarbonisierung des Energiesystems haben. Dazu werden verschiedene Szenarien modelliert und das gesamte Energiesystem berücksichtigt, indem spezialisierte Sektormodelle für Gebäude, Industrie, Verkehr, Geräte und Energieangebot (elektrische Energie, Wärme, Wasserstoff) sowie Gas- und Elektrizitätsnetze miteinander verbunden werden. Die Studie legt dabei einen Fokus auf den verstärkten Einsatz von elektrischer Energie in den Nachfragesektoren. Dieses Szenario wurde vor der Novelle des Klimaschutzgesetzes modelliert, daher wird Treibhausgasneutralität erst im Jahr 2050 erreicht. [STI22]

Im Rahmen des Modellvergleichs kombiniert die Ariadne Studie die Ergebnisse von sechs Gesamtsystem- und Sektormodellen, um verschiedene Transformationspfade zur Erreichung der Klimaneutralität bis 2045 zu erforschen, wobei unterschiedliche technologische Schwerpunkte berücksichtigt werden. Während

die Gesamtsystemmodelle sektorübergreifende energiewirtschaftliche Wechselwirkungen betrachten, bieten die Sektormodelle eine spezifische Perspektive auf Transformationsmöglichkeiten und -herausforderungen der einzelnen Sektoren. Diese Vielfalt an Modellen ermöglicht es, eine breite Palette relevanter struktureller Unsicherheiten und Optionen aufzuzeigen, während gleichzeitig robuste Eigenschaften der Transformation über die verschiedenen Modelle hinweg herausgearbeitet werden. In Abbildung 2.4 sind drei verschiedene Modelle dargestellt. Das Modell REMIND ist ein ausgeglichenes Modell, während REMod einen starken Fokus auf die Gebäudewärme setzt. Das PanEU Modell konzentriert sich auf ein Pan-europäische Energiesystem. [STI22]

### **2.2.2. Stromsektor-GWP-Datensätze**

Neben Jahreswerten für die Interaktion mit dem Stromsektor, wie sie beispielsweise in der ÖKOBAUDAT enthalten sind [BBS23], sind für diese Arbeit stündlich aufgelöste Emissionswerte für die Interaktion mit dem Elektrizitätsnetz nötig. Für vergangene Jahre gibt es solche Datensätze beispielsweise vom Agora-Meter, einem Online-Tool von Agora Energiewende zur Visualisierung und Analyse von Energiedaten in Echtzeit [KLE23]. Für die nachfolgend vorgestellten Verfahren werden diese Daten allerdings auch für zukünftige Jahre inklusive eines Dekarbonisierungspfades benötigt.

Im Artikel von Seckinger et al. [SEC21] werden dynamische, stündlich aufgelöste Treibhausgas-Emissionsfaktoren für den deutschen Stromsektor bis 2050 entwickelt. Dabei werden zwei Szenarien untersucht. Diese Szenarien sind Business-As-Usual (BAU) mit einer Emissionsreduktion des Stromsektors von 74 % sowie der Climate-Action-Plan (CAP) mit einer Reduktion von 95 % gegenüber dem Referenzjahr 1990. Mithilfe eines Stromsektormodells werden sowohl die durchschnittlichen Emissionsfaktoren (DEF) als auch die marginalen Emissionsfaktoren (MEF) berechnet. Im BAU-Szenario reduziert sich der DEF bis 2050 auf etwa 39 % des Ausgangswerts, während er im CAP-Szenario sogar auf rund 6 % sinkt. Dies ist verbunden mit mehr als 3700 nahezu emissionsfreien Stunden pro Jahr. Der MEF, der die Emissionen bei kurzfristigen Nachfrageänderungen abbildet, startet anfangs auf einem hohen Niveau von über 100 % des Referenzwerts, nimmt jedoch langfristig im CAP-Szenario durch den vermehrten Einsatz

von Gaskraftwerken deutlich ab. Während die DEF in stündlicher Auflösung vorliegen, werden die MEF lediglich als Jahresmittelwerte angegeben. Darüber hinaus beziehen sich die Emissionswerte ausschließlich auf CO<sub>2</sub>-Emissionen. Andere Lebenszyklus-Emissionsfaktoren werden nicht berücksichtigt. Die Ergebnisse verdeutlichen die starke zeitliche Variabilität der Emissionsfaktoren, die durch den Ausbau erneuerbarer Energien, den Kohleausstieg sowie durch den Einsatz von importierter elektrischer Energie und Energiespeichern beeinflusst werden. Gleichzeitig heben sie hervor, dass durchschnittliche jährliche Emissionswerte für ökologische Bewertungen nicht ausreichen.

In Blanke et al. [BLA24b] habe ich gemeinsam mit meinen Koautoren ein Verfahren entwickelt, mit dem stündliche DEF und MEF für den Stromsektor berechnet werden können. Der Schwerpunkt liegt dabei auf der Weiterentwicklung der Methodik von Seckinger et al. [SEC21], insbesondere durch eine verbesserte Abbildung von Speichern sowie die Berücksichtigung zusätzlicher Umweltwirkungskategorien neben Treibhausgasemissionen. Als Basis für diese Analyse dienen Stromdaten, welche auf den großen fünf oben genannten Studien basieren.

### **2.3. Methoden zur energetischen Bewertung von Gebäuden**

Die energetische Bewertung von Gebäuden stellt einen zentralen Bestandteil der Bauplanung und des Gebäudemanagements dar, da sie die Grundlage für die Optimierung des Energieverbrauchs sowie die Reduktion von Treibhausgasemissionen bildet [SAN20]. Dabei kommen unterschiedliche Methoden zum Einsatz, die je nach Zielsetzung und verfügbaren Daten variieren. Vereinfachte Ansätze, wie das Monatsbilanzverfahren, basieren auf monatlich gemittelten Klimadaten und ermöglichen eine schnelle Abschätzung des Energiebedarfs, insbesondere in frühen Planungsphasen [CLA01; TRE10]. Im Gegensatz dazu erlauben dynamische Ganzjahressimulationen eine hochaufgelöste zeitliche Analyse des energetischen Verhaltens von Gebäuden unter Berücksichtigung thermischer Massen, Nutzerverhalten und klimatischer Schwankungen [TRE10; CRA01]. Aktuelle Forschungsarbeiten betonen die Bedeutung der Entwicklung von Qualitätsstandards und Validierungsverfahren für Gebäudesimulationen, um die Plausibilität

der Ergebnisse sicherzustellen und die Anwendbarkeit als Planungswerkzeug zu erhöhen [NOU20; GRU22]. Zudem werden zunehmend statistische Ansätze integriert, um Unsicherheiten, beispielsweise durch variierendes Nutzerverhalten oder Klimafaktoren, abzubilden und robustere Planungsgrundlagen zu schaffen [SPI20; TRE10]. Die Kombination verschiedener Bewertungsverfahren ermöglicht es, sowohl schnelle energetische Einschätzungen als auch detaillierte Analysen zur Optimierung von Gebäudetechnik und Energiesystemen durchzuführen. Moderne Simulationsmethoden integrieren zudem zunehmend die Kopplung von Gebäuden mit gebäudenahen Energiesystemen, wie Wärmepumpen oder saisonalen Wärmespeichern, um eine ganzheitliche Bewertung zu gewährleisten. [MÜL17]

### **2.3.1. Monatsbilanzverfahren (DIN V 18599)**

Die DIN V 18599 ist eine deutsche Vornorm, die der normierten energetischen Bewertung von Gebäuden sowie deren gebäudetechnischen Systemen dient. Ziel dieser Norm ist es, eine integrierte und umfassende Erfassung des Energiebedarfs auf Basis eines Monatsbilanzverfahrens zu ermöglichen. Sie bildet sämtliche relevanten Energieanwendungen ab, einschließlich Raumheizung, Raumkühlung, Lüftung, Trinkwassererwärmung und Beleuchtung. [WIL22; DIN18c]

Im Unterschied zu vereinfachten Berechnungsverfahren bietet die DIN V 18599 eine systematische, detaillierte und sektorübergreifende Analyse des Energiebedarfs. Eine Differenzierung zwischen Wohn- und Nichtwohngebäuden ist mit einfacheren Verfahren prinzipiell auch möglich. Die besondere Stärke der DIN V 18599 liegt vielmehr in ihrer Fähigkeit, komplexe energetische Wechselwirkungen innerhalb eines Gebäudes, sowie zwischen dessen Anlagentechnik und Nutzungsprofilen konsistent abzubilden. Sie ermöglicht damit eine realitätsnähere energetische Bilanzierung, insbesondere für Nichtwohngebäude mit heterogenen Nutzungsanforderungen. [WIL22; DIN18c]

Im Kontext des Gebäudeenergiegesetzes (GEG) kommt der Norm eine zentrale Rolle zu, da sie die methodische Grundlage für die Ausstellung von Energieausweisen und die Bewertung von sowohl Einzelmaßnahmen als auch Effizienzhäusern bildet [BMW23].

### 2.3.2. Ganzjahressimulation (DIN EN ISO 52016)

Die DIN EN ISO 52016 ist eine internationale Norm, die sich mit der energetischen Bewertung von Gebäuden beschäftigt, insbesondere im Hinblick auf den Heiz- und Kühlbedarf [DIN18b]. Die DIN EN ISO 52016 bietet detaillierte Berechnungsverfahren für die stündliche und monatliche Ermittlung von Heiz- und Kühllasten sowie den daraus resultierenden Energiebedarf. Sie berücksichtigt Aspekte wie die thermische Masse des Gebäudes, solare Gewinne, innere Wärmequellen und den Einfluss von Fenstern und Beschattungssystemen. Die Norm stellt ein Verfahren vor, welches auf einem Widerstands- und Kapazitätsmodell basiert, welches in Abbildung 2.5 schematisch dargestellt ist. Dabei repräsentieren die Widerstände die Wärmeleistung innerhalb der Bauteile (z. B. Wände, Fenster), während die Kapazitäten die thermische Speichermasse von Bauteilen und Raumluft abbilden. Wände werden mit vier Widerständen und fünf Kapazitäten abgebildet und Fenster mit einem Widerstand und zwei Kapazitäten. Diese Aufteilung der Wände erlaubt eine realitätsnähere Abbildung der durch strömenden Wärme, als ohne Aufteilung in mehrere Abschnitte. [BAL20b; FEL20; ZAK21]

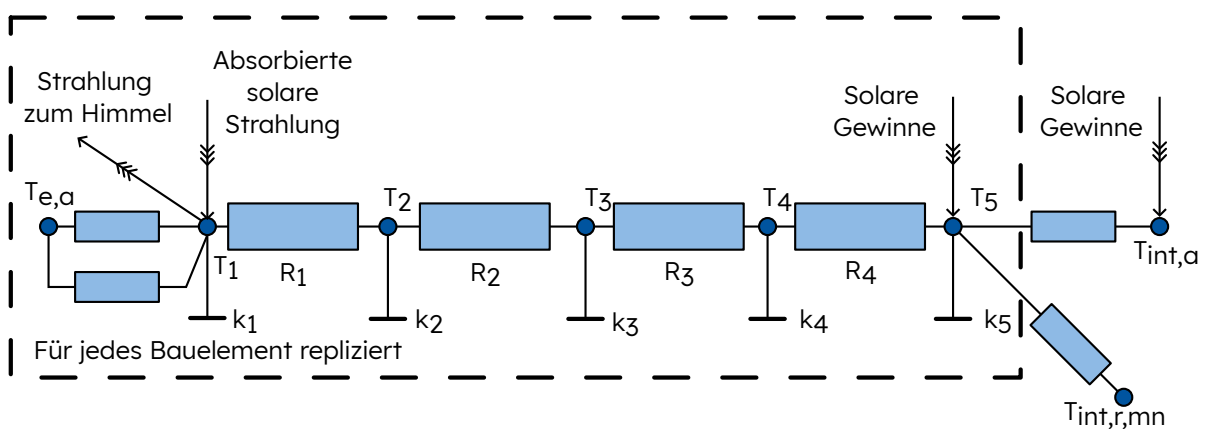


Abbildung 2.5.: Schematische Abbildung des Widerstands- und Kapazitätsmodells der DIN EN ISO 52016 [BAL20b]

Die DIN EN ISO 52016 basiert auf einem vereinfachten, stündlich aufgelösten Rechenmodell zur Berechnung des thermischen Verhaltens von Gebäuden. Im Vergleich zu umfangreichen Ganzjahressimulationsprogrammen wie EnergyPlus, TRNSYS oder IDA ICE, die detaillierte dynamische Modelle mit komplexen physikalischen Wechselwirkungen abbilden, ist die DIN EN ISO 52016 deutlich we-

niger rechenintensiv. Während Ganzjahressimulationen typischerweise auf numerischen Verfahren wie der Finite-Differenzen- oder Finite-Elemente-Methode basieren, verfolgt die DIN EN ISO 52016 mit dem Widerstands- und Kapazitätsmodell einen analytisch vereinfachten und numerisch schlanken Ansatz, um eine Balance zwischen Genauigkeit und Praktikabilität zu ermöglichen. [DIN18b]

In der Praxis wird die DIN EN ISO 52016 daher vor allem für normative Nachweise und Vorabschätzungen eingesetzt. Im deutschsprachigen Raum haben jedoch insbesondere die Richtlinienreihen VDI 6007, VDI 6020 und VDI 2078 eine herausragende Bedeutung erlangt [ROU08; GRU22]. Während die DIN EN ISO 52016 ein international harmonisiertes Berechnungsverfahren bereitstellt, enthalten die VDI-Richtlinien detailliertere Vorgaben und praxisnahe Rechenverfahren, die speziell auf deutsche Rahmenbedingungen und Planungsgewohnheiten zugeschnitten sind. Die VDI 6007 definiert stündlich aufgelöste Berechnungsverfahren für das thermisch-energetische Verhalten von Räumen und Bauteilen, während die VDI 6020 standardisierte Validierungsszenarien bereitstellt, um die Zuverlässigkeit und Genauigkeit thermischer Simulationsprogramme sicherzustellen. Die VDI 2078 ergänzt dieses Regelwerk durch ein detailliertes Verfahren zur dynamischen Berechnung der Kühllast von Gebäuden. [VDI12; VDI15; VDI22]

## **2.4. Lastprofile und Gleichzeitigkeit in Quartiersnetzen**

Ein Quartier bezeichnet im urbanen Kontext einen räumlich zusammenhängenden Bereich innerhalb einer Stadt oder Gemeinde, der durch bestimmte soziale, funktionale oder bauliche Merkmale charakterisiert ist. Dabei kann es sich um ein Wohnviertel, ein gemischt genutztes Areal oder ein Gebiet mit spezifischer infrastruktureller Ausstattung handeln. Quartiere bilden häufig die Grundlage nachhaltiger Stadtentwicklungsstrategien, da sie eine überschaubare Einheit darstellen, in der Maßnahmen zur Mobilität, Energieversorgung und sozialen Integration effektiv umgesetzt werden können. [FRA22b; SCH23] Im Rahmen dieser Arbeit liegt der Fokus auf der energetischen Versorgung solcher Quartiere.

Im Kontext der Energieversorgung beschreibt der Begriff „Gleichzeitigkeit“ den Faktor der Reduktion der tatsächlichen maximalen Leistungsanforderung im

Vergleich zur Summe der individuellen Spitzenlasten aller Abnehmer. Der Gleichzeitigkeitsfaktor liegt zwischen 0 (keine gleichzeitige Last) und 1 (gleichzeitiger Leistungsbedarf entspricht Spitzenlast aller Einzelverbraucher). Diese Reduktion ergibt sich aus der zeitlichen Streuung der Bedarfsspitzen, wodurch die erforderliche Spitzenleistung in Nahwärmenetzen deutlich geringer ausfällt, als es die Summe der Einzelwerte vermuten ließe. Der Gleichzeitigkeitsfaktor, der diesen Effekt quantifiziert, ist ein zentraler Parameter für die Dimensionierung von Wärmenetzen und Wärmeerzeugungsanlagen in Quartiersenergiesystemen. [WIN01; WEI19; KOS20]

Eine exakte Berücksichtigung dieses Effekts erlaubt eine wirtschaftlichere Planung und effizientere Ressourcennutzung, da Komponenten der Energieinfrastruktur nicht überdimensioniert werden müssen. Insbesondere bei kleinen und mittleren Quartierslösungen führt dies zu geringeren Bau- und Betriebskosten und ermöglicht eine bedarfsgerechte Auslegung für unterschiedliche Nutzergruppen und Gebäudestrukturen. [WIN01; WEI19; KOS20]

In Blanke et al. [BLA24b] habe ich gemeinsam mit meinen Koautor:innen vier Modelle vorgestellt, mit denen die Gleichzeitigkeitsfaktoreffekte bei der Aggregation von Einzelgebäudelastprofilen zu einem Quartierslastprofil berücksichtigt werden können. Diese vier Modelle sind:

- **Durchschnitts-Modell (Durschn.):**  
Skaliert das ursprüngliche Lastprofil auf einen Mittelwert (z. B. Tages- oder Jahresmittel) unter Einhaltung eines gleichzeitigkeitsbasierten Skalierungsfaktors. Dieses Modell ist rechnerisch einfach, aber sensitiv gegenüber der Wahl des Mittelwertzeitraums.
- **Referenzprofil-Modell (RefP):**  
Skaliert das Originalprofil auf ein definiertes Referenzprofil. Die Skalierung wird so angepasst, dass die Anforderungen an den Gleichzeitigkeitsfaktor erfüllt bleiben. Dieses Modell liefert eine hohe Genauigkeit bei geeigneter Wahl des Referenzprofils.
- **Normalverteilungs-Modell (NV):**  
Verteilt die Leistungen eines Zeitpunkts statistisch auf benachbarte Zeitpunkte unter Annahme einer Normalverteilung, mit dem Ziel Lastspitzen zu glätten.

Dieses Modell ist besonders rechenintensiv, führt aber zu reduzierten Fluktuationen im Lastprofil.

- Kombiniertes Modell (NV+Ref):

Verteilt die Differenz zwischen Original- und Referenzprofil normalverteilt auf Nachbarzeitpunkte und addiert sie zum Referenzprofil. Dieses Modell verbindet die Vorteile beider vorhergehenden Ansätze, birgt jedoch das Risiko einer suboptimaler Referenzprofilwahl.

Die vier Modelle sind in Abbildung 2.6 visualisiert. Die Wahl des geeigneten Modells hängt davon ab, ob es sich beim Lastprofil um elektrische Energie oder um Wärme handelt, außerdem von der Anzahl betrachteter Gebäude sowie der Verfügbarkeit geeigneter Referenzdaten. Die Studienergebnisse zeigen, dass für elektrische Lastprofile das Referenzprofil-Modell das beste Quartierslastprofil liefert, während das Normalverteilungsmodell bei wenigen Gebäuden für Wärmebedarfe besser geeignet ist.

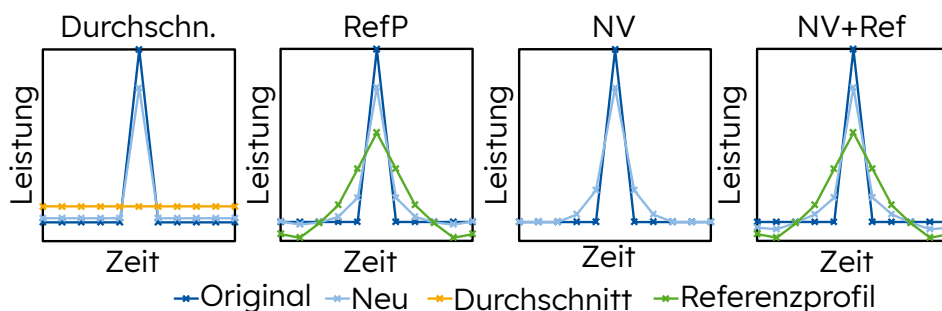


Abbildung 2.6.: Prinzipskizze der verschiedenen Modelle um Lastprofile mithilfe eines Gleichzeitigkeitsfaktors zu skalieren [BLA24b]

## 2.5. Wetterdaten

Wetterdaten spielen eine entscheidende Rolle in verschiedenen Bereichen, von der Landwirtschaft und Energieerzeugung bis hin zur Gebäudeplanung und Klimaforschung. Sie liefern wertvolle Informationen über atmosphärische Bedingungen wie Temperatur, Windgeschwindigkeit, Sonnenstrahlung und Luftfeuchtigkeit. Genauigkeit und Zuverlässigkeit von Wetterdaten sind entscheidend für fundierte Entscheidungen und das Verständnis der Auswirkungen des Klimawandels. Während Wetterdatensätze der Vergangenheit primär durch die Genauig-

keit der Messung und Auswahl der typischen Wetterperioden beeinflusst wurden, werden die Wetterprognosen für die Zukunft stark durch den Klimawandel beeinflusst. [MOS10]

Die repräsentativen Konzentrationspfade (Representative Concentration Pathways (RCP)) sind Szenarien, die vom zwischenstaatlichen Ausschuss für den Klimawandel (Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)) entwickelt wurden, um zukünftige Treibhausgaskonzentrationen und deren Auswirkungen auf das Klimasystem zu projizieren. Die RCP bieten einen Rahmen zur Untersuchung verschiedener Emissionspfade und ihrer potenziellen Klimaauswirkungen. Die RCP werden anhand des Strahlungsantriebs-Niveaus (das Gleichgewicht zwischen eingehender und abgehender Wärmestrahlung) benannt, die sie bis zum Jahr 2100 repräsentieren. Sie umfassen RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 und RCP8.5, wobei jede Zahl den zusätzlich erwarteten Strahlungsantrieb in Watt pro Quadratmeter ( $W/m^2$ ) bis zum Ende des Jahrhunderts im Vergleich zur vorindustriellen Zeit darstellt. RCP2.6 steht für ein Szenario mit geringen Emissionen, während RCP8.5 ein Szenario mit hohen Emissionen repräsentiert. [IPC23]

Die Berücksichtigung dieser RCP hin zu höheren Jahresmitteltemperaturen führt bei der energetischen Simulation von Gebäuden dazu, dass der Heizbedarf sinkt und der Kühlbedarf ansteigt [SU21; HOS24]. Der Deutsche Wetterdienst (DWD) bringt Wetterdatensätze für ein normales Jahr, ein besonders warmes und ein besonders kaltes Jahr für heutige Wetterverhältnisse und für Verhältnisse in der Zukunft heraus (Testreferenzjahre). [DWD23] Neben dem DWD gibt es auch Wetterdaten der Software Meteororm. Diese Software generiert standortbezogene Klimadatensätze, indem sie Messwerte aus weltweiten Wetterstationen mit statistischen Verfahren ergänzt und interpoliert. Dabei können Nutzer bestimmte Randbedingungen, wie Standort, Zeitschritt oder Klimaszenarien, selbst einstellen, um individuelle Datensätze zu erstellen. Alternativ stehen auch fest definierte Referenzdatensätze zur Verfügung. Die Meteororm-Software gibt Wetterdaten mit RCP-Einfluss in 10 Jahresauflösung heraus. [MET23]

### **2.5.1. Testreferenzjahre (DWD)**

Die Testreferenzjahre (TRJ) werden vom DWD zur Verfügung gestellt und dienen als meteorologische Referenzdatensätze für Deutschland. Sie werden verwendet, um das Klima an einem bestimmten Ort über einen Zeitraum von in der Regel mehreren Jahrzehnten zu repräsentieren. Die TRJ-Datensätze enthalten meteorologische Daten wie Temperatur, Niederschlag, Sonnenscheindauer und Windgeschwindigkeit. Diese Daten werden aus historischen Aufzeichnungen von Wetterstationen abgeleitet und aufbereitet. Die TRJ des DWD können nur für Deutschland standortbezogen erzeugt werden. [DWD23]

Es werden TRJ für die Jahre 2015 mit heutigen Klimabedingungen und für 2045 mit klimawandelbedingt extrapolierten Klimabedingungen frei herausgegeben. Für beide Jahre wird sowohl ein durchschnittliches Jahr als auch ein besonders warmes und ein besonders kaltes Jahr herausgegeben. Dies dient dazu auch für extremere Wetterbedingungen Tests durchführen zu können. Im Gebäudekontext kann zum Beispiel überprüft werden, ob die Kühlung auch für ein besonders warmes Jahr ausreichend dimensioniert ist oder die Heizung das Gebäude auch in einem besonders kalten Winter zuverlässig erwärmt. [DWD23] Da in dieser Arbeit ein Fokus auf die Betrachtung des Klimawandeleinflusses gelegt werden soll, wäre eine 5-10 Jahresauflösung vorteilhaft, dies bieten die TRJ nicht.

### **2.5.2. Meteonorm**

Meteonorm ist eine Software zur Bereitstellung von weltweiten Wetter- und Klimadaten. Die Datenbank enthält meteorologische Informationen aus einer Vielzahl von Quellen, darunter Wetterstationen, Satelliten und Klimamodellen. Sie bietet ähnlich wie die DWD-Datenbank detaillierte Daten zu Parametern wie Sonneneinstrahlung, Windgeschwindigkeit und -richtung, Temperatur, Luftfeuchtigkeit, sowie Niederschlag. [MET23]

Ein besonderer Vorteil von Meteonorm ist die Möglichkeit, standortbezogene Wetterdaten für nahezu jeden Punkt auf der Erde zu generieren, auch für Orte ohne direkte Messstation. Dies wird durch Interpolationsverfahren und die Kombination von Messwerten aus benachbarten Stationen ermöglicht. Darüber hinaus unterstützt Meteonorm langfristige Klimaprojektionen und Szenarien, was es

zu einem wertvollen Werkzeug für die Analyse von Klimaänderungen und deren Auswirkungen macht. [MET23]

Meteonorm bietet Wetterdaten auf Basis der RCP an. In diesen Wetterdaten werden die Daten an den erwarteten zukünftigen Verlauf von Treibhausgasemissionen und deren Auswirkungen auf das Klima beschreiben. Diese Daten können standortspezifisch in einer 10 Jahresauflösung erzeugt werden. [IPC23; MET23] Diese Auflösung lässt sich gut mit der Haupthypothese H4 des Wettereinflusses vereinbaren.

## **2.6. Betriebs- und Investitionsoptimierung von Energiesystemen**

Unter Optimierung wird die systematische Suche nach der besten Lösung innerhalb eines definierten Lösungsraums verstanden, wobei eine oder mehrere Zielfunktionen unter Einhaltung gegebener Nebenbedingungen maximiert oder minimiert werden [GRO99]. In der Energiewirtschaft bezieht sich Optimierung auf die effiziente Gestaltung und Nutzung von Energieerzeugungs-, Speicher- und Verteilungsinfrastrukturen, wobei technische, ökonomische und ökologische Zielgrößen berücksichtigt werden können. [HOF20; HOL23; WEL18]

In der mathematischen Optimierung kommen je nach Problemstruktur unterschiedliche Verfahren zur Anwendung. Im Folgenden werden die wichtigsten Ansätze, die typischerweise in der Planung und Betriebsoptimierung von Energiesystemen eingesetzt werden, dargestellt:

- **Lineare Programmierung (LP):**  
Dieses Verfahren setzt voraus, dass sowohl die Zielfunktion als auch alle Nebenbedingungen linear sind. LP-Modelle lassen sich effizient lösen und werden oft bei kontinuierlichen, deterministischen Problemen eingesetzt, etwa zur optimalen Lastverteilung in Energiesystemen mit bekannten Preisen und Bedarfen. [CON10; BAR06]
- **Gemischt-ganzzahlige lineare Programmierung (Mixed Integer Linear Programming MILP):**  
Eine Erweiterung der LP, bei der einige Variablen nur ganzzahlige Werte an-

nehmen dürfen. MILP ermöglichen die Modellierung diskreter Entscheidungen, wie die einmalige Investition in bestimmte Technologien oder die Auswahl zwischen Standorten. Sie sind weit verbreitet in der langfristigen Infrastrukturplanung sowie in der Betriebsoptimierung hybrider Energiesysteme. [PON16; HOF24; KUE20]

- Nicht-Lineare Programmierung (NLP):

Bei NLP-Problemen sind die Zielfunktion, die Nebenbedingungen oder beide nicht linear. Solche Modelle sind realitätsnäher, aber rechnerisch aufwendiger. Sie finden Anwendung beispielsweise bei der Optimierung thermischer Prozesse mit komplexen Wirkungsgradkurven oder bei der Modellierung von Speichersystemen mit nichtlinearem Lade-/Entladeverhalten. [FLO95; MIL15; HE22]

- Stochastische Optimierung:

Diese Ansätze berücksichtigen Unsicherheiten in den Eingangsparametern, wie beispielsweise dem Wetter oder den Energiepreisen, durch Szenarien oder Wahrscheinlichkeitsverteilungen. Sie sind besonders relevant bei der Planung unter Unsicherheit, wie der Integration erneuerbarer Energien oder der Netzausbauplanung. [WU24; AAS22; THO21]

- Metaheuristiken (z. B. genetische Algorithmen, Simulated Annealing):

Diese Metaheuristiken, also allgemeine Suchstrategien zur Lösung von Optimierungsproblemen, sind besonders nützlich bei komplexen oder diskreten Problemstellungen, bei denen klassische Methoden an ihre Grenzen stoßen. Sie unterscheiden sich von exakten Verfahren dadurch, dass sie nicht zwingend die mathematisch optimale Lösung garantieren, dafür aber oft in vertretbarer Rechenzeit sehr gute Näherungslösungen finden. Sie werden häufig zur Optimierung von Gebäuden, Quartieren oder komplexen Multienergiesystemen eingesetzt. [TAL09; ALI24a; EKR10; WOL17; YUM24; HE22]

Für die Optimierung von Energiesystemen, insbesondere bei der Kombination von Betriebsführung und Investitionsplanung, sind MILP-Modelle besonders geeignet. Sie ermöglichen es, sowohl kontinuierliche Prozesse (z. B. Energieflüsse) als auch diskrete Entscheidungen (z. B. Technologieauswahl, Anlagengrößen) abzubilden. Aufgrund ihrer Struktur und Lösungseffizienz sind MILP ein etablierter Standard in der techno-ökonomischen Modellierung von Energiesystemen.

[PON16; DE 22; BAA22; JAC24; ELL24] Auch bei der energetischen Bewertung von Gebäuden und Quartieren spielen Optimierungen eine wichtige Rolle [YOK15; YUS20; PIN17; SCH18].

Zur Lösung von MILP werden spezialisierte mathematische Optimierungsverfahren und sogenannte Solver eingesetzt. Diese bieten eine Vielzahl an Konfigurationsmöglichkeiten, mit denen das Lösungsverhalten gezielt beeinflusst werden kann. Dazu zählen unter anderem die Begrenzung der Rechenzeit (Zeitlimit), die Anzahl genutzter Prozessor-Threads zur parallelen Verarbeitung, sowie die Definition einer zulässigen Abweichung zwischen der besten gefundenen ganzzahligen Lösung und der optimalen Lösung der Relaxation ohne Ganzzahligkeitsbedingungen (MIP-Gap), um auch bei komplexen Problemen praktikable Lösungen in vertretbarer Zeit zu erhalten. Weitere wichtige Parameter betreffen die Vorverarbeitung des Modells (Presolve), durch die unnötige Variablen oder Nebenbedingungen erkannt und entfernt werden können, sowie die Heuristiken, die dem Solver ermöglichen, bereits früh im Lösungsprozess gute Näherungslösungen zu identifizieren. [GUR25] Gurobi und CPLEX gelten als die beiden schnellsten Solver auf dem Gebiet [JAB16].

Ein bewährtes Mittel in der MILP-Optimierung von Energiesystemen, um die Rechenzeit und Komplexität zu reduzieren, sind sogenannte typische Perioden. Sie dienen als repräsentative Perioden, die typische Muster von Energieverbrauch, Energieerzeugung und anderen relevanten Parametern einer langen Zeitperiode (z. B. ein Jahr) in kürzeren Zeitperioden (z.B. Tagen) abbilden. Ohne typische Perioden müsste jede Stunde eines gesamten Jahres einzeln berücksichtigt werden, was zu sehr großen und schwer lösbaren Optimierungsproblemen führen kann. Typische Perioden ermöglichen es, diese Datenmenge drastisch zu reduzieren, während die wichtigsten Eigenschaften wie Saisonalitäten, Lastspitzen oder typische Verbrauchsmuster erhalten bleiben. Dadurch bleibt die Qualität der Optimierung hoch, und die Berechnung wird gleichzeitig praktikabel. [KOT18a; HOF20]

Zur Erstellung von typischen Perioden kommen verschiedene Verfahren zum Einsatz, die typischerweise statistische Analysemethoden und Clustering-Techniken kombinieren. Diese sind in Abbildung 2.7 visualisiert. Häufig verwendete Ansätze

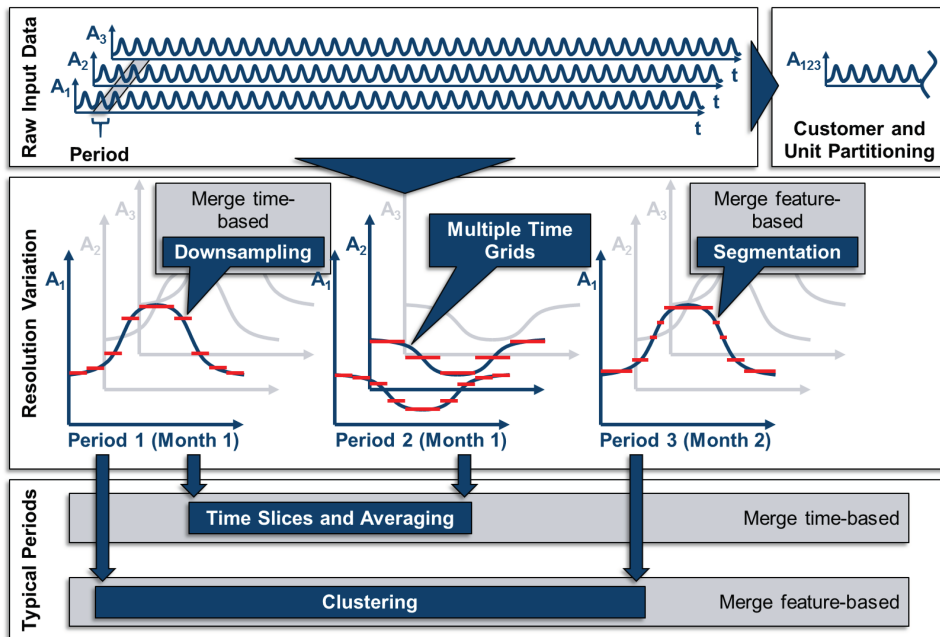


Abbildung 2.7.: Methoden der Zeitreihenaggregation für Energiesystemmodelle [HOF20]

sind das k-Means- oder k-Medoids-Clustering, bei dem die Perioden mit ähnlichen Profilen (z. B. Lastkurven oder Wetterdaten) in Gruppen zusammengefasst werden und eine repräsentative Periode pro Gruppe ausgewählt wird. Alternativ kann hierarchisches Clustering verwendet werden, das durch eine baumartige Struktur die Gruppierung flexibler anpassen kann. Neben rein datengetriebenen Ansätzen können auch heuristische Verfahren oder Optimierungsmodelle verwendet werden, um sicherzustellen, dass die typischen Perioden Extremszenarien oder seltene Ereignisse mit abdecken. [KOT18a; HOF20; TEI21]

Saisonale Speicher sind eine zentrale Herausforderung in der MILP-Optimierung von Energiesystemen, besonders bei der Nutzung von typischen Perioden. Sie dienen dazu, saisonale Schwankungen zwischen Energieangebot und -nachfrage auszugleichen, beispielsweise durch Speicherung überschüssiger Solarenergie im Sommer für die Nutzung im Winter. Ein besonderer Fokus liegt dabei auf der Bilanzierung der Speicherladezustände über die typischen Perioden hinweg, um sicherzustellen, dass die Speicher zwischen den typischen Perioden korrekt modelliert werden. Ein weit verbreiteter Ansatz bei der Abbildung von Speichern mit typischen Perioden ist der, dass der Ladezustand am Ende der Periode dem La-

dezustand am Anfang der Periode entsprechen muss. Zudem ist dieser Ladezustand am Periodenübergang für alle Perioden gleich. Andere Ansätze arbeiten damit, dass sich der Ladezustand während einer Periode um einen bestimmten Betrag ändert und somit Energie über die Perioden hinaus transportiert werden kann. Wichtig dabei zu beachten ist, dass der Ladezustand des Speichers sowohl während der Periode als auch zwischen den Perioden nicht das maximale oder minimale Kapazitätslimit überschreitet. [KOT18b; BLA22]

## 2.7. Sensitivitätsanalyse

In der energetischen Bewertung von Gebäuden und Quartieren basiert die Modellierung auf zahlreichen Eingangsparametern – etwa Wetterdaten, Nutzerverhalten, internen Lasten oder technischen Auslegungen [CAL13; VAN23]. Da viele dieser Parameter mit Unsicherheiten behaftet sind oder auf Annahmen beruhen, stellt sich die Frage, wie stark einzelne Eingangsgrößen die Ergebnisse beeinflussen [CAL13; VAN23; SAL09; HEL06]. Die systematische Untersuchung der individuellen Einflüsse auf das Ergebnis erfolgt im Rahmen einer sogenannten Sensitivitätsanalyse [SAL00].

Sensitivitätsanalysen dienen dazu, die Reaktion eines Modells auf Änderungen seiner Eingangswerte zu quantifizieren oder qualitativ zu beschreiben. Ziel ist es, die Robustheit der Ergebnisse zu prüfen, dominante Einflussgrößen zu identifizieren oder die Spannweite möglicher Systemverhalten einzugrenzen. [SAL10] Sie sind insbesondere dann von Bedeutung, wenn Entscheidungen auf Modellrechnungen basieren oder wenn bestimmte Eingabewerte nicht exakt bekannt sind [MCC05].

Je nach Fragestellung und methodischem Aufbau unterscheidet man verschiedene Arten der Sensitivitätsanalyse. Lokale Sensitivitätsanalysen betrachten Änderungen einzelner Parameter, während globale Verfahren die gleichzeitige Variation mehrerer Parameter im gesamten Parameterraum untersuchen [SAL09; PIA16]. Auch die Art der Variation kann unterschiedlich ausfallen – von einfachen festen Szenarienwerten, beispielsweise mit oder ohne der Betrachtung von klimawandelbedingten Temperaturänderungen, bis hin zu statistischen Methoden wie Monte-Carlo-Simulationen oder Varianzzerlegungen. [SAL00; SOB01]

---

Im Rahmen dieser Arbeit wird eine vereinfachte, szenarienbasierte Sensitivitätsanalyse durchgeführt, bei der gezielt einzelne Parameter verändert werden, um die resultierende Bandbreite der energetischen Bewertung sichtbar zu machen.

## 3. Stand der Technik

In diesem Kapitel erfolgt eine systematische Einordnung und wissenschaftliche Bewertung energieeffizienter Technologien im Gebäudebereich unter besonderer Berücksichtigung ihrer Rolle innerhalb ganzheitlicher Quartiersenergiekonzepte. Die Darstellung geht über eine reine Aufzählung technischer Systeme hinaus und ordnet diese in funktionale Cluster ein. Zudem wird der Bezug zu aktuellen Entwicklungen der Energiewende und zu systemischen Ansätzen auf Quartiersebene hergestellt.

Zur besseren Einordnung der Vielzahl an Technologien wird eine Clusterung in fünf funktionale Kategorien vorgenommen, die sich an der Rolle der jeweiligen Technologie im energetischen Gesamtsystem eines Gebäudes oder Quartiers orientiert (vgl. [DEU21]):

1. Energieumwandlung
2. Energiespeicherung
3. Energieverteilung und -nutzung
4. Gebäudehülle
5. Systemintegration in Quartiersenergiekonzepte

Die folgenden Abschnitte erläutern diese Cluster im Detail.

### 3.1. Cluster 1: Energieumwandlung

Dieses Cluster umfasst Technologien, die Primär- oder Sekundärenergie in nutzbare Wärme, Kälte oder Elektrizität umwandeln. Dazu zählen unter anderem Wärmepumpen, PV und geothermische Systeme. Die Auswahl dieser Technologien hängt stark von den verfügbaren Ressourcen (z. B. Sonne, Erdreich, Luft), dem Temperaturniveau und den Anforderungen des Gebäudes bzw. Quartiers ab.

#### 3.1.1. Wärmepumpen

Eine Wärmepumpe ist eine energiesparende Heiz- und Kühllösung bezogen auf Primär- bzw. Endenergie, die Wärme auf niedrigerem Temperaturniveau auf-

nimmt und sie auf ein höheres Temperaturniveau hebt, um beispielsweise ein Gebäude zu heizen oder zu kühlen. Das Anheben des Niveaus kann über einen Absorptions- oder Adsorptionsprozess sowie über einen elektrisch oder gasmotorisch betriebene Kompressor erfolgen. In den meisten Fällen erfolgt dies über einen elektrisch betriebenen Kompressor. Wärmepumpen können verschiedene Wärmequellen wie Luft, Wasser oder Erdwärme nutzen. Die verbreitetste Art ist die Luft-Wasser-Wärmepumpe (L-W-WP), welche die Wärme aus der Umgebungsluft entzieht und sie zur Heizung von Gebäuden oder zur Bereitstellung von Warmwasser nutzt. Diese Art von Wärmepumpe ist einfach zu installieren und eignet sich besonders gut für Gebiete mit moderaten Klimabedingungen. [QUA23; BÖC17]

Eine weitere verbreitete Variante ist die Sole-Wasser-Wärmepumpe (S-W-WP), welche Wärme aus dem Erdreich entzieht. Diese Art von Wärmepumpe ist besonders effizient und zuverlässig, da die Temperatur des Erdreiches im Vergleich zur Luft das ganze Jahr über konstanter ist. Schließlich gibt es auch Wasser-Wasser-Wärmepumpen (W-W-WP), die Wärme aus einem Wasserreservoir wie einem Brunnen oder einem Fluss entnehmen. Diese Systeme sind besonders effizient, erfordern jedoch den Zugang zu einem ausreichenden Wasservorkommen. Dabei ist zu beachten, dass die Errichtung in Wasserschutzgebieten in der Regel stark eingeschränkt oder untersagt ist. Die genauen Vorgaben unterscheiden sich je nach Schutzzone und regionalen wasserrechtlichen Bestimmungen [QUA23; BÖC17].

In Analogie zum Wirkungsgrad wurde für Wärmepumpen eine Leistungszahl definiert (Coefficient Of Performance (COP)). Diese ist für elektrisch betriebene Wärmepumpen definiert als Heizleistung ( $\dot{Q}_h$ ) durch elektrische Leistung ( $P_{el}$ ) [GLA22; BÖC17]:

$$\text{COP} = \frac{\dot{Q}_h}{P_{el}} \quad (3.1)$$

Die Degradation von Wärmepumpen ist von besonderer Relevanz, da sie einen wesentlichen Einfluss auf die Effizienz gebäudetechnischer Systeme ausübt. Griffith et al. [GRI08] untersuchten hierzu den Einfluss fehlender Wartung auf den

Leistungskoeffizienten (COP) von Wärmepumpen. Sie stellten eine jährliche Effizienzabnahme von 1 % ohne Wartung sowie von lediglich 0,25 % bei regelmäßiger Wartung fest. Diese Ergebnisse verdeutlichen die Bedeutung von Degradationsprozessen und Instandhaltungsmaßnahmen und liefern zugleich einen Anknüpfungspunkt für die im Rahmen der Haupthypothese H5 näher betrachtete Degradation der Gebäudetechnik.

Zur Berechnung der Leistungszahl existieren verschiedene Modellansätze. Diese reichen von Modellen mit quadratischem Temperatureinfluss [TRA16] über Modelle mit lediglich binären Betriebszuständen (Ein/Aus) [SCH15; WOL17] bis hin zu detaillierten Modellen, die Komponenten wie Wärmetauscher und Kompressoren abbilden [HUA19; MOR12]. Allerdings haben Tran et al. [TRA16] herausgefunden, dass ein einfaches Modell, welches linear abhängig von der Quellen- ( $T_{in,Quelle}$ ) und Senktemperatur ( $T_{in,Senke}$ ) ist, bereits gute Ergebnisse erzeugt. Dieses lineare Modell nutzt drei numerisch bestimmte Koeffizienten ( $\rho_{cop,1}$ ,  $\rho_{cop,2}$ ,  $\rho_{cop,3}$ ) und ist in der folgenden Gleichung dargestellt [VER10; SCH91; TJA21; TRA16]:

$$COP = \rho_{cop,1} + \rho_{cop,2} \cdot T_{in,Quelle} + \rho_{cop,3} \cdot T_{in,Senke} \quad (3.2)$$

Auch die maximale elektrische Leistung kann mit guten Ergebnissen als linear abhängig von der Quellen- und Senktemperatur betrachtet werden. Dieses lineare Modell nutzt ebenfalls drei numerisch bestimmte Koeffizienten ( $\rho_{el,1}$ ,  $\rho_{el,2}$ ,  $\rho_{el,3}$ ) und ist in der folgenden Gleichung dargestellt [VER10; SCH91; TJA21; TRA16]:

$$P_{el} = \rho_{el,1} + \rho_{el,2} \cdot T_{in,Quelle} + \rho_{el,3} \cdot T_{in,Senke} \quad (3.3)$$

Abbildung 3.1 zeigt die Leistungszahl einer Luft-Wasser-Wärmepumpe sowie einer Sole-Wasser-Wärmepumpe in Abhängigkeit von unterschiedlichen Quell- und Senktemperaturen. Die dargestellten Werte basieren auf generischen Wärmepumpenmodellen, die aus der öffentlich zugängliche Datenbank der hplib ermittelt werden [TJA21]. Die hplib (Heat Pump Library) stellt herstellerunabhängige Leistungsdaten verschiedener Wärmepumpensysteme bereit. Aus der Abbildung wird deutlich, dass die Leistungszahl mit abnehmender Quelltemperatur und zunehmender Senktemperatur sinkt, da in diesen Fällen die erforderliche Tem-

peraturdifferenz und somit der Energieaufwand der Wärmepumpe steigt. Zudem ist ersichtlich, dass Sole-Wasser-Wärmepumpen im Durchschnitt eine etwa um eins höhere Leistungszahl aufweisen als Luft-Wasser-Wärmepumpen. Damit weisen Sole-Wasser-Wärmepumpen typischerweise eine etwa 15–25 % höhere Effizienz als Luft-Wasser-Wärmepumpen auf [TJA21], was in der späteren Modellierung berücksichtigt wird.

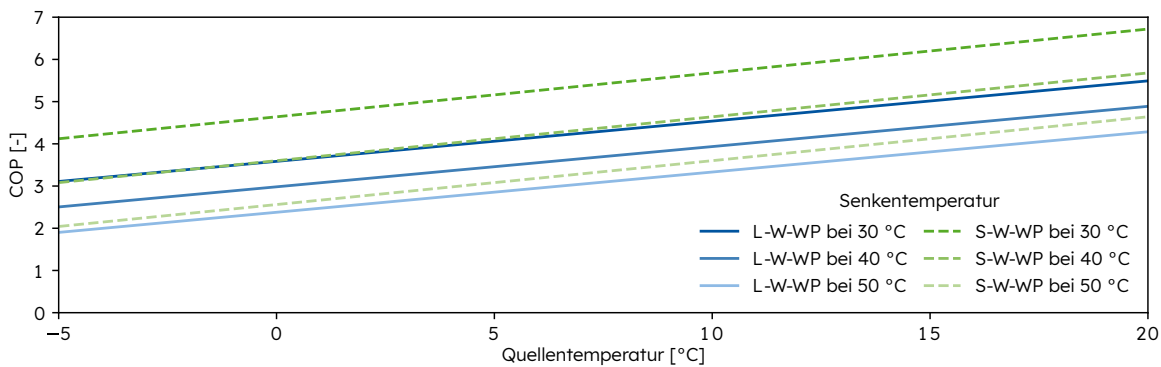


Abbildung 3.1.: Leistungszahlen von Wärmepumpen: Exemplarische Darstellung für Luft-Wasser- (L-W-WP) und Sole-Wasser- (S-W-WP) Wärmepumpen bei verschiedenen Temperaturniveaus der Wärmequelle

Neben der Heizung kann die Wärmepumpe auch zu Kühlzwecken eingesetzt werden. Hier gibt das Energieeffizienzverhältnis (Energy Efficiency Ratio (EER)) die Effizienz an. Dieses Verhältnis ist definiert als Kühlleistung ( $\dot{Q}_C$ ) durch elektrischen Aufwand [QUA23; BÖC17]:

$$EER = \frac{\dot{Q}_C}{P_{el}} \quad (3.4)$$

Auch diese kann über einen linearen Ansatz mit drei numerisch bestimmte Koeffizienten ( $p_{eer,1}$ ,  $p_{el,2}$ ,  $p_{el,3}$ ) abgebildet werden [VER10; TJA21]:

$$EER = p_{eer,1} + p_{eer,2} \cdot T_{in,Quelle} + p_{eer,3} \cdot T_{in,Senke} \quad (3.5)$$

Abbildung 3.2 zeigt den EER einer Luft-Wasser-Wärmepumpe für verschiedene Quell- und Senketemperaturen im Kühlbetrieb. Die Daten basieren auf generi-

schen Wärmepumpen, da sie aus dem Datensatz der hplib gemittelt wurden [TJA21]. Es ist ersichtlich, dass der EER mit abnehmender Quelltemperatur und steigender Senktemperatur abnimmt, da die Temperaturdifferenz in diesen Fällen zunimmt.

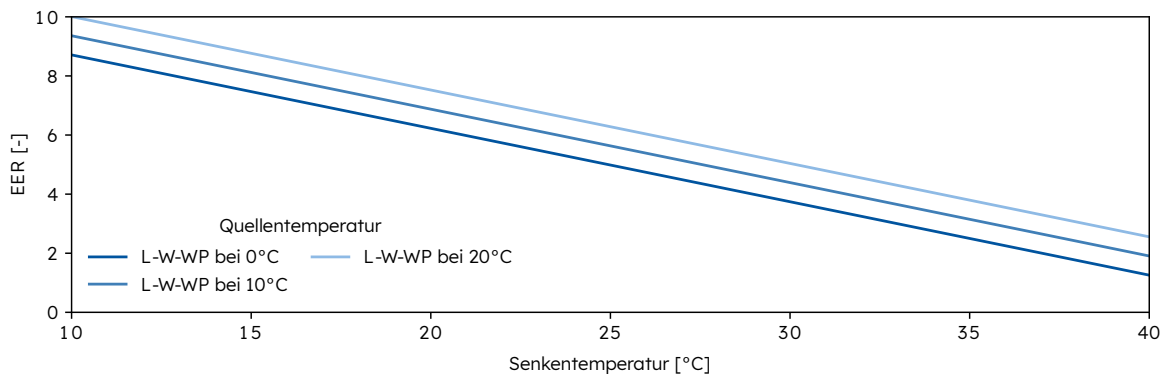


Abbildung 3.2.: Energieeffizienzverhältnis einer generischen Wärmepumpe

Der Schwerpunkt der späteren Optimierung liegt auf der Luft-Wasser- und Sole-Wasser-Wärmepumpe, da sie im Gebäudesektor die mit Abstand größte Verbreitung aufweisen [BUN25] und durch die in der hplib bereitgestellten generischen Modelle konsistent abgebildet werden können. Wasser-Wasser-Wärmepumpen werden hingegen aufgrund regulatorischer Einschränkungen in Wasserschutzgebieten nicht betrachtet.

### 3.1.2. Photovoltaik

Photovoltaik (PV) ist eine Technologie, die Sonnenlicht direkt in elektrische Energie umwandelt. Es gibt verschiedene Arten von PV-Modulen, darunter monokristalline Siliziummodule (Mono-Si), polykristalline Siliziummodule (Poly-Si) und Dünnschichtmodule. Monokristalline Siliziummodule hatten 2021 einen Marktanteil von 84 % und polykristalline von 11 %. Den geringsten Anteil machen Dünnschichtmodule, wie Module aus amorphem Silizium, Cadmiumtellurid (CdTe) oder Kupfer-Indium-Gallium-Diselenid (CIGS), aus. [PHI23]

Mono-Si-Module werden aus monokristallinem Silizium hergestellt, welches aus einem einzigen Kristall besteht. Diese Module zeichnen sich durch einen hohen Wirkungsgrad aus, der typischerweise im Bereich von 18 % bis über 24 % liegt

[GRE24b; FON25; SOL23]. Sie haben eine hohe Energieumwandlungseffizienz und benötigen weniger Fläche für die gleiche Leistung im Vergleich zu anderen Modultypen. Allerdings benötigen sie einen aufwendigeren und kostenintensiveren Herstellungsprozess als andere Modultypen. [QUA23]

Poly-Si-Module werden aus polykristallinem Silizium hergestellt, das aus mehreren kristallinen Strukturen besteht. Sie sind kostengünstiger in der Herstellung als monokristalline Module, haben aber auch einen etwas niedrigeren Wirkungsgrad, der typischerweise im Bereich von 15 % bis 20% liegt [GRE24b; FON25; SOL23]. Poly-Si-Module benötigen dementsprechend mehr Fläche als Mono-Si-Module, um die gleiche Leistung zu erzielen. [QUA23]

Dünnschichtmodule bestehen aus dünnen Schichten von photovoltaischem Material wie amorphem Silizium, Cadmiumtellurid oder Kupfer-Indium-Gallium-Selenid (CIGS). Diese Module haben den Vorteil, dass sie kostengünstig in der Herstellung sind und auch bei diffuserem Licht gut funktionieren. Ihr Wirkungsgrad liegt jedoch in der Regel niedriger als bei kristallinen Siliziummodulen und variiert je nach Materialtyp. Amorphe Siliziummodule haben typischerweise einen Wirkungsgrad von etwa 10 % bis 14 %, während CIGS- und CdTe-Module Wirkungsgrade von etwa 12 % bis 16 % erreichen können. [QUA23; NRE24; FON25; SOL23]

Besonders im Fokus stehen aktuell Mehrfachsolarzellen, die durch die Kombination mehrerer Subzellen mit abgestimmten Bandlücken die Effizienz erheblich steigern können. Beispielsweise erreichte eine dreizellige Zelle im Labor bereits 39,5 % unter terrestrischer Sonneneinstrahlung [FRA22a]. Im Tandem-Bereich ist derzeit Longi führend. Im April 2025 erzielte eine kristalline Silizium-Perowskit Tandem-Zelle eine zertifizierte Effizienz von 34,85 %, bestätigt durch das National Renewable Energy Laboratory (NREL) [LON25]. Laborexperimente mit Mehrfachsolarzellen unter konzentrierter Beleuchtung zeigen sogar Effizienzen über 46 %, wobei III-V-Konzentriererzellen seit 2006 regelmäßig mehr als 40 % erreichen [NRE24].

Gebäude-integrierte Photovoltaik (Building-Integrated Photovoltaics (BIPV)) beschreibt die Integration von PV-Komponenten direkt in die Gebäudehülle – etwa Dächer, Fassaden oder Fenster – wobei diese sowohl als Bauteil dienen als

auch Strom erzeugen [BIY17; KUR23; YAN15b]. Moderne BIPV-Systeme übernehmen multifunktionale Aufgaben wie Wärmedämmung, Verschattung, Tageslichtlenkung oder ästhetische Gestaltung und ersetzen konventionelle Baustoffe [MAR18; BON24; CHE24]. Semitransparente PV-Verglasungen sind besonders vielversprechend. Simulationen und Fallstudien zeigen je nach Transparenzgrad, Fensteranteil und Klima Energieeinsparungen zwischen etwa 7 % und 47 % im Vergleich zu Standardverglasung [KUR23; KUH21; MAR18]. Darüber hinaus beeinflussen BIPV-Komponenten zunehmend thermischen und visuellen Komfort, was bei der Bewertung solcher Systeme berücksichtigt werden sollte [BON24].

Auch Photovoltaikanlagen zeigen Degradationsprozesse, mit jährlichen Leistungsverlusten von 0,5 % bis 2 % [DEC23; IEA21; LIN22], welche im Rahmen von Haupthypothese H5 untersucht werden.

### **3.1.3. Geothermie**

Bei der Nutzung geothermischer Energie – also der im Erdreich gespeicherten Wärme – wird üblicherweise zwischen drei Nutzungstiefen unterschieden [STO20b]:

- Oberflächennahe Geothermie (bis ca. 150 m Tiefe),
- Mitteltiefe Geothermie (zwischen 150 m und 1000 m),
- Tiefe Geothermie (ab ca. 1000 m Tiefe).

Die tiefe Geothermie ermöglicht durch hohe Temperaturen von über 60 °C eine direkte thermische Nutzung, etwa zur Fernwärmeversorgung oder zur Produktion elektrischer Energie. Die mitteltiefe Geothermie stellt in technischer und wirtschaftlicher Hinsicht häufig eine Übergangslösung dar. Sie kann höhere Temperaturen als die oberflächennahe Geothermie liefern, erfordert aber geringere Bohrtiefen und Investitionen als die tiefe Geothermie, wodurch sie z. B. für bestimmte gewerbliche Anwendungen interessant ist. Die oberflächennahe Geothermie hingegen liefert geringere Temperaturen (bis ca. 25 °C), weshalb eine zusätzliche Wärmepumpe zur Temperaturerhöhung erforderlich ist. Gleichzeitig erlaubt sie jedoch auch die Nutzung zu Kühlzwecken (freie Kühlung) und ist aufgrund ihrer geringeren technischen Komplexität und Investitionskosten für dezentrale Anwendungen im Gebäudesektor besonders relevant. Aus die-

sen Gründen liegt der Fokus dieser Arbeit auf der oberflächennahen Geothermie. [STO20b]

Im Bereich der oberflächennahen Geothermie sind Erdwärmekollektoren und Erdwärmesonden die beiden am häufigsten eingesetzten Systeme. Erdwärmekollektoren werden in geringer Tiefe (bis ca. 1,6 m) flächig im Boden verlegt und benötigen daher eine erhebliche Grundstücksfläche. Daher liegt der Schwerpunkt dieser Arbeit auf vertikalen Erdwärmesonden, da sie das Erdreich in die Tiefe erschließen und damit flächeneffizienter sind. Diese Sonden werden typischerweise bis in Tiefen von 100 m eingebracht, wo das Temperaturniveau über das Jahr deutlich konstanter ist als nahe der Oberfläche. [STO20b]

### **3.1.3.1. Typen von Erdwärmesonden**

Die am weitesten verbreiteten Sondentypen sind U-Rohr-Sonden (z. B. ein- oder zwei U-Rohre pro Bohrung) und Koaxialsonden. Bei U-Rohr-Sonden werden ein, zwei oder mehr Kunststoffrohre mit einem U-förmigen Fuß in die Bohrung eingebracht, durch die das Wärmeträgerfluid in die tieferen Bodenschichten und zurück bis ein paar Meter unter die Geländeoberkante fließt. Die Koaxialsonde hingegen besteht aus einem konzentrischen Rohrsystem, bei dem das Wärmeträgerfluid im Ringspalt in die Tiefe und im inneren Rohr bis ein paar Meter unter Geländeoberkante strömt. U-Rohr-Sonden gelten als Standard. [STO20a] Unter identischen Rahmenbedingungen weist eine Koaxialsonde ein höheres spezifisches thermisches Leistungspotenzial bei geringeren hydraulischen Verlusten auf als eine Doppel-U-Rohr-Sonde [QUA19; BLA21c; BRO24]. Eine schematische Darstellung dieser beiden Varianten zeigt Abbildung 3.3.

Energiepfähle stellen eine weitere Variante dar, bei der Tragkonstruktion und geothermische Nutzung kombiniert werden. Dabei handelt es sich um im Boden gegründete Pfähle, die sowohl die Lasten eines Bauwerks aufnehmen als auch als Wärmetauscher dienen, indem in ihnen Rohrleitungen zur Wärmeentnahme oder -abgabe integriert sind. Diese werden vor allem im urbanen Raum oder bei nicht tragfähigem Baugrund verwendet. [STO20b] Besonders vielversprechend sind hier Stahlenergiepfähle aufgrund ihres hohen thermischen Leistungspotenzials [BLA21c]. Allerdings muss bei solchen Systemen verstärkt auf die hydraulische Auslegung geachtet werden, um überhöhte Druckverluste und damit hohe

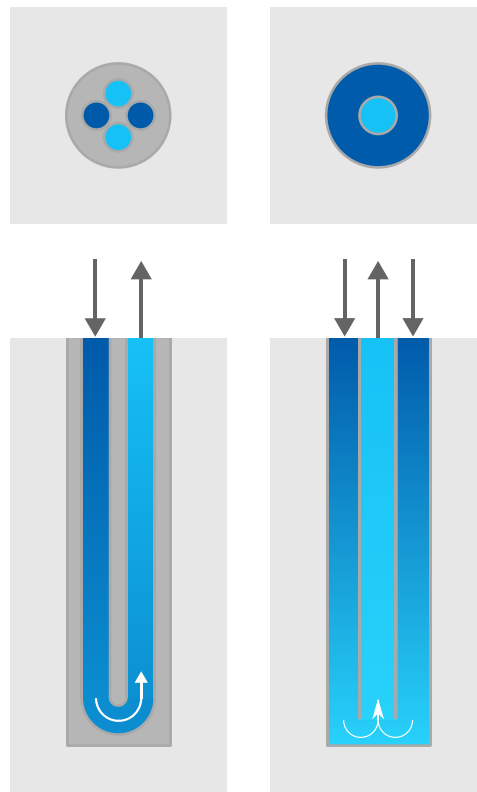


Abbildung 3.3.: Typen von Erdwärmesonden (links: 2U-Sonde, rechts: Koaxialsonde)

Pumpenergien zu vermeiden [BLA21a].

Ein zentraler Parameter für die Leistungsfähigkeit von Erdwärmesonden ist der thermische Bohrlochwiderstand ( $R_b$ ). Er beschreibt den Wärmewiderstand zwischen dem Wärmeträgerfluid in der Sonde und dem umgebenden Erdreich. Der Wert von  $R_b$  wird im Wesentlichen durch die Rohrgeometrie, das eingesetzte Verfüllmaterial sowie die Wärmeübergangsbedingungen im Inneren des Rohrs bestimmt. [HEL91; VDI19] Typische Werte liegen je nach Sondentyp, Verfüllmaterial und Ausführungsqualität im Bereich von etwa 0,05 bis 0,15 m K/W [VDI19]. Messungen im Rahmen von Thermal-Response-Tests bestätigen diesen Bereich, wobei gut ausgeführte Doppel-U-Sonden meist bei 0,07–0,12 m K/W liegen, während Koaxialsonden Widerstände von um die 0,05 m K/W erreichen können [GEH02; RAY15; BLA21c]. Ein geringer Bohrlochwiderstand ist entscheidend für hohe Entzugs- und Einspeiseleistungen.

### 3.1.3.2. Ertragsberechnung von Erdsondenfeldern

Zur quantitativen Bewertung der nutzbaren geothermischen Leistung werden häufig sogenannte g-Funktionen verwendet, wie sie ursprünglich von Eskilson et al. [ESK87] eingeführt wurden. Diese Funktionen basieren auf dem Logarithmus der dimensionslosen Zeit ( $\ln(t/t_s)$ ) und ermöglichen die Abschätzung der Bodentemperaturantwort auf eine gegebene Wärmelast über verschiedene Zeitskalen hinweg. Die g-Funktion ist dabei abhängig von der Geometrie des Sondenfelds, den thermophysikalischen Eigenschaften des Untergrunds sowie der Wärmeleitfähigkeit der Sondenfüllung. [ESK87]

Als Alternative zu den g-Funktionen bieten sich numerische Simulationsmodelle an, welche komplexere geologische und hydraulische Bedingungen abbilden können [PAL12; ZAR17; WIL20]. Auch vereinfachte analytische Modelle wie das g-Funktions-Modell nach Javed et al. [JAV11] finden Anwendung, insbesondere zur Auslegung größerer Sondenfelder mit thermischer Interaktion.

In dieser Arbeit werden die g-Funktionen aufgrund ihrer breiten Integration in gängige Berechnungssoftware (z. B. EED, GHEtool) und ihrer breiten Anerkennung in Normen und Regelwerken (z. B. VDI 4640) verwendet. Sie ermöglichen bei vertretbarem Rechenaufwand eine ausreichend genaue Ertragsabschätzung. Dabei wird auf das Modell nach Blanke et al. [BLA24a] zurückgegriffen, welches im Kapitel 5.3.7 ausführlich beschrieben wird.

### 3.1.4. Wasserbasierte elektrische Heizsysteme

Wasserbasierte elektrische Heizungen nutzen entweder Heizstäbe im Speicher oder Durchlauferhitzer, um Wasser zu erwärmen, das anschließend im Heizkreislauf zirkuliert. Heizstäbe im Speicher ermöglichen die Wärmeerzeugung und Speicherung für den späteren Gebrauch, während Durchlauferhitzer Wärme bedarfsgerecht bereitstellen.

Untersuchungen zeigen, dass die Effizienz dieser Systeme stark von der Bauart abhängt. So ermittelten Hegazy et al. [HEG02] für einen einzelnen Heizstab im Speicher eine Effizienz von lediglich 73 %. Wird hingegen die Anordnung optimiert, können deutlich höhere Werte erzielt werden. Sezai et al. [SEZ05] berichteten in diesem Fall von einer Effizienz von 93 %.

Auch Durchlauferhitzer wurden vielfach untersucht. Thomas et al. [THO06] testeten sechs Geräte und fanden eine durchschnittliche Effizienz von 80 %, wobei die Ergebnisse zwischen 76 % und 88 % schwankten. Sowmy et al. [SOW08] untersuchten zehn Geräte und kamen auf einen Mittelwert von 75 % mit einer Bandbreite von 62 % bis 85 %.

Insgesamt ergibt sich damit ein in der Literatur dokumentierter Effizienzbereich von etwa 62 % bis 93 %, der die Grundlage für die im weiteren Verlauf dieser Arbeit getroffenen Modellannahmen bildet.

## **3.2. Cluster 2: Energiespeicherung**

Energiespeicher stellen die zeitliche Entkopplung zwischen Energieerzeugung und -nutzung sicher. Dies ist insbesondere bei fluktuierenden Quellen wie PV oder bei Lastverschiebung durch Wärmepumpen erforderlich. In diesem Cluster werden sowohl thermische Speicher (sensible und latente) als auch elektrische Energiespeicher (elektrochemisch, mechanisch, chemisch) betrachtet.

### **3.2.1. Thermische Speicher**

Es gibt verschiedene Arten thermische Energie zu speichern. Die Energie kann von einer sensiblen Temperaturänderung, einem Phasenwechsel oder einer chemischen Reaktion aufgenommen werden. [GOE21]

Bei einem sensiblen Speichermedium wird die Energie in eine Temperaturänderung des Speichermediums überführt. Klassische sensible Speicher sind Warmwasserspeicher und Pufferspeicher. Bei Warmwasserspeicher handelt es sich um einen Trinkwasserspeicher, in dem das Wasser direkt erwärmt und später für den Verbrauch genutzt wird. Dies unterscheidet ihn von einem Pufferspeicher für die Heizung, der Heizungswasser speichert, um kurzfristige Schwankungen zwischen Wärmeerzeugung und -bedarf auszugleichen, ohne dass dieses Wasser direkt als Trinkwasser verwendet wird. Hier wird das Speichermedium Wasser beispielsweise von 40 °C auf 50 °C erwärmt und nimmt damit Wärme auf. Umgekehrt kann er durch eine Temperatursenkung diese aufgenommene Wärme wieder abgeben. [GOE21]

Bei gut ausgelegten sensiblen Speichern liegen die prozessnahen Lade- bzw. Entladewirkungsgrade einzelner Zyklen meist bei 95 bis 99 %, da im Wesentlichen nur Wärmeübertrager- und Durchmischungsverluste anfallen. Die entscheidenden Verluste sind jedoch die Selbstentladungen durch Wärmeleitung über die Hülle. Für typische 300 L Speicher werden in Simulationen und Feldstudien stationäre Verlustleistungen von ca. 80 W bis über 200 W berichtet (entspricht 1,9 kWh/d bis 4,8 kWh/d, abhängig von Temperaturniveau und Randbedingungen). [JUN24] Weitere Studien zeigen, dass Standverluste mit Speichervolumen und Betriebstemperatur deutlich steigen und bei größer dimensionierten Speichern über 10 % des gespeicherten Energieinhalts pro Tag erreichen können, falls die Dämmung nicht entsprechend angepasst wird [MAR21; RIT21; WIL23].

Eine Alternative sind Speicher mit einem Phasenwechselmaterial. Hier wird die Wärme durch einen Phasenwechsel, also beispielsweise der Änderung des Aggregatzustands von fest zu flüssig, aufgenommen. Durch die Umkehr des Phasenwechsels kann dann diese Energiemenge wieder abgegeben werden. Die Vorteile latenter Speichermedien liegen in der höheren Speicherdichte verglichen mit sensiblen Speichern und der Wärmeaufnahme beziehungsweise Abgabe auf einem näherungsweise konstanten Temperaturniveau. Der Phasenwechsel findet bei nahezu konstantem Druck und konstanter Temperatur statt. Das heißt, dass sich die Temperatur während des Phasenwechsels nicht signifikant ändert. Ein Beispiel für Phasenwechselspeicher sind Eisspeicher. Hier wechselt das Speichermedium Wasser bei 0 °C durch Wärmezufuhr den Aggregatzustand von festem Eis zu flüssigem Wasser. Bei Energieentzug findet der isotherme Phasenwechsel entsprechend umgekehrt von flüssig zu fest statt. In diesem Phasenwechsel steckt dieselbe Energiemenge wie in einer Temperaturänderung von Wasser von 0 °C auf knapp über 80 °C. [GOE21]

Für latente Speichersysteme werden je nach Aufbau Lade-/Entladewirkungsgrade im hohen zweistelligen Bereich gemessen. Ein aktueller Speicher auf PCM-Basis zeigt beispielsweise einen zyklischen Wirkungsgrad von etwa 85 % im 24-h-Betrieb [MIK24]. Bei Labortests mit einem geschlossenen Eisspeichersystem auf Basis von Schraubkapseln wurden Lade-/Entladewirkungsgrade von bis zu 96 % erreicht, bezogen auf definierte stationäre Betriebsbedingungen [KIM06], wobei hohe Wärmeübergangswi-

derstände im Eis die Lade-/Entladedauer erhöhen und die nutzbare Leistung begrenzen [YAN23; ROD22]. Die Selbstentladung latenter Speicher folgt denselben Wärmeverlustmechanismen, wie bei sensiblen Speichern [RIT21]. Die Größenordnung entspricht daher der von gedämmten Wassertanks [RIT21].

Zur langfristigen Speicherung thermischer Energie über Zeiträume von mehreren Monaten, um saisonale Differenzen zwischen Energieerzeugung und -verbrauch auszugleichen, kommen saisonale Wärmespeicher zum Einsatz. Typische Anwendungen finden sich in solarthermischen Nah- und Fernwärmesystemen, bei denen im Sommer gewonnene Solarwärme für die Nutzung im Winter zwischengespeichert wird. Technisch kommen hierfür unter anderem Erdbecken-Wärmespeicher, Aquiferspeicher oder Erdsondenfelder zum Einsatz. Diese Speicher weisen aufgrund der großen Speichervolumina (teils mehrere zehntausend Kubikmeter) vergleichsweise geringe spezifische Wärmeverluste auf, wodurch eine saisonale Nutzung wirtschaftlich und energetisch sinnvoll wird. [SCH04; HAD05; HES15]

### **3.2.2. Elektrische Energiespeicher**

Elektrische Energiespeicher spielen eine wichtige Rolle im Elektrizitätsnetz, die künftig zum Ausgleich von Schwankungen in der erneuerbaren Energieerzeugung weiter wachsen wird. Sie dienen zum kurz-, mittel- und zunehmend auch langfristigen Ausgleich eines Ungleichgewichts zwischen elektrischer Energieerzeugung und elektrischem Energiebedarf [ZAP22].

Es gibt verschiedene Arten, elektrische Energie zu speichern. Elektrische Energie kann entweder direkt elektrisch in Kondensatoren oder Spulen gespeichert werden. Durch eine hohe Selbstentladung ist das primär für kurzfristige Speicherung elektrischer Energie sinnvoll. Eine weitere Möglichkeit sind mechanische Speicher. Hier wird die elektrische Energie in potenzielle oder kinetische Energie umgewandelt. Beispiele dafür sind Pumpspeicherkraftwerke, welche eine langfristige Speicherung erlauben und Schwungmassenspeicher, die aufgrund der Reibungsverluste nur für kurzfristige Schwankungen im Elektrizitätsnetz geeignet sind. Pumpspeicherkraftwerke haben einen von ca. Lade-/Entladewirkungsgrade ca. 70–82 % bei quasi keiner Selbstentladung, da das Wasser nicht zurückfließt oder signifi-

kant verdunstet. [STE17] Schwungradspeicher haben dagegen sehr hohe Lade-/Entladewirkungsgrade mit bis zu 95 %, entladen sich allerdings aufgrund der Reibung mit 10-50 %/h sehr schnell [LI22].

Die wohl bekannteste Art, elektrische Energie zu speichern, sind elektrochemische Speicher. Hier wird die elektrische Energie in einer reversiblen chemischen Reaktion umgesetzt. Ein klassisches Beispiel sind Lithium-Ionen-Akkumulatoren aus Elektrogeräten, in welchen die chemischen Reaktanten fest verbaut sind. [BAS22] Lithium-Ionen-Akkumulatoren haben einen Lade-/Entladewirkungsgrad von ca. 90–96 % bei einer Selbstentladung ca. 0,2 %/Tag [BAS22; CHE09]. Eine Alternative stellen Redox-Flow-Speicher dar, in denen die Reaktanten flüssig sind und zwischen einem elektrochemischen Wandler (Zelle) und Speichertanks hin- und hergepumpt werden [CHE17]. Der Lade-/Entladewirkungsgrad bei Redox-Flow-Speicher beträgt 70-85 % bei keiner Selbstentladung [CHE17].

Neben der elektrochemischen Speicherung gibt es noch die chemische Speicherung, die als Power-to-Gas bezeichnet wird. Hier wird die elektrische Energie mittels Wasserelektrolyse und ggf. weiterer Prozessschritte zur Erzeugung eines Brenngases (oft Wasserstoff, ggf. Ammoniak, Methan) genutzt. Dieses Brenngas kann zur Rückgewinnung der elektrischen Energie entweder in einem Gaskraftwerk verbrannt oder effizienter in einer Brennstoffzelle elektrochemisch umgewandelt werden. Diese Brenngase haben eine verglichen mit elektrochemischen Speichern hohe Energiedichte. Außerdem bieten chemische Speicher die Möglichkeit der Langzeitspeicherung, da die Gasmoleküle in geeigneten Speichern nicht austreten oder reagieren und somit keine bis sehr geringe Selbstentladung stattfindet. Power-To-Gas hat keine relevanten Langzeitverluste, dafür allerdings mit ca. 25 -40 % den geringsten Gesamtwirkungsgrad über den gesamten Zyklus. [JEN15]

Thermische Elektrizitätsspeicher bieten ebenfalls eine Möglichkeit, elektrische Energie zu speichern. Hier wird elektrische Energie in Hochtemperaturwärme umgewandelt und anschließend die Wärme wieder in elektrische Energie. Thermische Elektrizitätsspeicher haben mit ca. 30–60 % ebenfalls niedrige Lade-/Entladewirkungsgrad, wobei diese stark abhängig von der Technologie abhän-

gen. [ZAP22] Dies Speicher haben allerdings mit 2-4%/Tag hohe Langzeitverluste, da sich Wärme schlecht lange speichern lässt [WEI21]. Deshalb sind diese Speicher für eine mittelfristige Speicherung geeignet.

Der Fokus dieser Arbeit liegt auf elektrochemischen Speichern, da sie sich aufgrund hoher Lade-/Entladewirkungsgrade, ihrer weiten Verbreitung und der verlässlichen Datenlage besonders für eine Abbildung in der nachfolgenden Optimierung eignen.

### **3.3. Cluster 3: Energieverteilung und -nutzung**

Dieses Cluster umfasst Systeme, die für die effiziente Verteilung und Nutzung von Wärme, Kälte und Luft in Gebäuden verantwortlich sind. Dazu zählen insbesondere mechanische Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung, hydraulische Rohrnetze, Flächenheiz- und -kühlsysteme sowie automatisierte Verschattungslösungen zur Steuerung solarer Einstrahlung. Durch ihre Funktionsweise beeinflussen diese Systeme sowohl den Energiebedarf als auch den thermischen Komfort der Nutzerinnen und Nutzer unmittelbar und stellen somit zentrale Elemente einer nachhaltigen Gebäudetechnik dar.

#### **3.3.1. Lüftungstechnik / Wärmerückgewinnung**

Die Lüftungstechnik in Gebäuden spielt eine entscheidende Rolle für die Luftqualität und den Energieverbrauch. Ohne mechanische Lüftung erfolgt der Luftaustausch durch Infiltration und Fensterlüftung. Bei einem Temperaturunterschied zwischen Innen- und Außenluft führt dies zu Energieverlusten. In Gebäuden mit einer mechanischen Lüftungsanlage inklusive Wärmerückgewinnung hingegen wird die Energie der Abluft genutzt, um die Zuluft vorzuwärmen, wodurch Heizenergie eingespart werden kann. Dies geschieht typischerweise über Wärmeübertrager, welche die Wärme aus der Abluft auf die zugeführte Zuluft übertragen. Dadurch wird nicht nur der Energieverbrauch reduziert, sondern auch die Luftqualität verbessert, da die Luft durch Filter gereinigt wird, bevor sie in das Gebäude gelangt. Voraussetzung für die Verbesserung der Luftqualität ist eine regelmäßige Wartung der Anlage. [DUN22]

Eine Review-Studie zeigt, dass zentrale und dezentrale Wärmerückgewinnungs-

systeme Effizienzen von etwa 70–90 % erreichen [ZEN21]. Grundsätzlich wird zwischen drei Typen von Wärmerückgewinnungssystemen unterschieden. Rekuperative Systeme (z.,B. Plattenwärmeübertrager) übertragen Wärme durch feste Trennwände, sodass die Luftströme vollständig getrennt bleiben. Sie nutzen ausschließlich sensible Wärme und erreichen typische Wirkungsgrade von etwa 60–85 %. Spezielle Enthalpie-Plattenwärmetauscher mit Polymermembran können zusätzlich auch latente Wärme (Feuchtigkeit) übertragen. Regenerative Systeme (z.,B. Rotationswärmeübertrager) speichern die Wärme zeitweise in einem rotierenden Speichermedium, das zwischen Zu- und Abluft pendelt. Sie übertragen sensible Wärme und – in der Ausführung als Enthalpierotor – auch latente Wärme, wodurch der thermische Komfort insbesondere in Winterperioden verbessert werden kann. Kreislaufverbundsysteme übertragen die Wärme über einen separaten Flüssigkeitskreislauf zwischen zwei räumlich getrennten Wärmeübertragern. Diese Bauweise eignet sich vor allem für große Anlagen oder Anwendungen, bei denen eine direkte Verbindung der Luftströme vermieden werden muss. [AME21]

Neueste Entwicklungen umfassen luftdurchlässige Gebäudehüllen, die gleichzeitig Lüftung, Wärmerückgewinnung und Filtration übernehmen [ZHA23]. Außerdem wird die Integration von Phasenwechselmaterialien als thermischer Speicher in Lüftungsanlagen erforscht, um die Wärmerückgewinnung noch effektiver zu gestalten [ZEN21]. Neuere Untersuchungen haben Wärmerückgewinnungssysteme mit sogenannten Wärmerohren verbessert, die Wärme durch Verdampfung und Kondensation eines Arbeitsmediums übertragen [JOU23]. Stattdessen wird ein Plattenwärmetauscher mit einem Wärmerückgewinnungsgrad von 80 % [KLI23; BRÜ12] als Referenzsystem angenommen, da er dem Stand der Technik entspricht [DIN17].

### **3.3.2. Rohrnetze und hydraulische Verteilung**

Rohrnetze bilden die physische Verteilstruktur wassergeführter Heiz- und Kühlsysteme und beeinflussen durch Druckverluste und Pumpenenergie die Systemeffizienz. Ihre Verluste fallen jedoch im Vergleich zum Gebäudeheiz- bzw. -kühlbedarf gering aus, sodass Rohrnetze und deren Einfluss auf die thermischen Lasten im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter berücksichtigt werden [GEO17].

### 3.3.3. Heiz- und Kühlflächen

Flächensysteme wie Boden-, Wand- oder Deckenflächen können sowohl zur Beheizung als auch zur Kühlung eingesetzt werden. Heizflächen unterscheiden sich dabei in Betriebspunkt, Trägheit und Temperaturniveau. Radiatoren arbeiten mit höheren Vorlauftemperaturen und schnellerer Regelbarkeit, während Flächenheizungen (Fußboden-/Wandheizungen) niedrigere Temperaturen, homogenere Strahlungswärme und höhere thermische Trägheit aufweisen. Flächensysteme ermöglichen den Betrieb mit niedrigen Vorlauftemperaturen (ca. 35 °C), in Kombination mit Niedertemperaturquellen wie Wärmepumpen oder Solarwärme führt dies zu Effizienzsteigerungen. [MIC19; LOP24; VAD19]

Die Kühlung erfolgt durch Absorption von Strahlungs- und konvektiver Wärme, wobei Decken- und Wandflächen in der Regel schneller und effizienter reagieren als die Fußbodenheizung im Estrich. Fußboden-Kühlsysteme sind wegen der thermischen Trägheit und des Kondensationsrisikos in warm-feuchten Klima oft auf zusätzliche Maßnahmen wie Entfeuchtung angewiesen. [ZHU23; BIZ23]

In den im weiteren Verlauf betrachteten Gebäuden kommen Flächensysteme zum Einsatz. Diese ermöglichen durch ihre große Übertragungsfläche die Nutzung niedriger Vorlauftemperaturen, wodurch die spätere Festlegung einer Kondensatorvorlauftemperatur von 40 °C für die Modellierung der Wärmepumpe begründet wird.

### 3.3.4. Automatisierte Verschattung

Die automatisierte Verschattung von Fenstern bietet zahlreiche Vorteile, darunter eine effektive Regulation der Raumtemperatur und des Lichteinfalls. Durch die Steuerung von Sonnenlichteinfall und damit einhergehenden Wärmeeintrag kann ein eventueller Kühlbedarf reduziert werden, was zu Kosteneinsparungen und einem verbesserten Raumkomfort führt. Programmierbare Verschattungen, die es ermöglichen, die Verschattung je nach Tageszeit, Jahreszeit und Wetterbedingungen anzupassen, bieten die Möglichkeit den Komfort und die Energieeffizienz weiter zu verbessern. Trotz dieser Vorteile gibt es auch einige Nachteile, wie beispielsweise die anfänglichen Installationskosten sowie potenzielle Wartungs- und Reparaturkosten für die automatisierten Systeme. Zudem kann eine unzu-

reichende Planung oder Kalibrierung zu unerwünschten Lichtverhältnissen oder Einschränkungen der Aussicht führen. [WIL22; VOG22]

Die automatisierte Verschattung von Fenstern kann in verschiedenen Formen umgesetzt werden. Diese sind innenliegende, außenliegende und fensterintegrierte Systeme. Innenliegende Systeme, wie Rollos oder Jalousien, bieten eine einfache Installation und sind oft kostengünstiger. [WIL22] Jedoch sind diese Systeme weniger effektiv bei der Reduzierung des Wärmeeintrages, mit typischen Abminderungsfaktoren ( $F_c$ ) im Bereich von etwa 0,35 bis 0,60 [DIN18b]. Außenliegende Systeme, wie Markisen oder Außenjalousien, bieten eine wirksame Wärmeregulierung und Blendungsreduzierung, erfordern jedoch oft eine aufwändigere Installation und sind anfällig für Witterungseinflüsse. Hier liegen die Abminderungsfaktoren je nach Stellung und Ausführung meist zwischen 0,1 (geschlossene Rollläden) und 0,40 (Markisen, Screens) [DIN18b]. Fensterintegrierte Systeme, wie Fenster mit integrierten Lamellen oder elektrochromen Beschichtungen, bieten eine elegante Lösung, welche die Vorteile von innen- und außenliegenden Systemen kombiniert. Je nach Transparenzstufe und Schaltzustand werden Abminderungswerte im Bereich von etwa 0,20 bis 0,50 erreicht [DIN18b]. Diese integrierten Systeme sind jedoch teurer als außen oder innenliegende Systeme und erfordern oft eine sorgfältige Planung während des Bauprozesses. [WIL22; VOG22]

### **3.4. Cluster 4: Gebäudehülle**

Die Gebäudehülle stellt die Schnittstelle zwischen Innen- und Außenklima dar und bestimmt maßgeblich den Heiz- und Kühlbedarf eines Gebäudes. Ihre Qualität beeinflusst nicht nur die energetische Effizienz, sondern auch den thermischen Komfort sowie den Schutz vor Lärm und Witterungseinflüssen. Besonders die Wärmedämmung bildet eine zentrale Grundlage jeder energetischen Planung – sowohl im Neubau als auch in der Sanierung – und zielt auf eine passive Reduktion des Energieverbrauchs ab. Neben der Dämmung spielen auch Fenster, Verschattungselemente und Materialwahl eine entscheidende Rolle für die Gesamtleistung der Gebäudehülle.

### 3.4.1. Funktionen und Klassifizierung von Dämmstoffen

Dämmstoffe dienen primär dem Wärmeschutz, tragen aber auch zum Schall- und Brandschutz bei [NER11]. Da kein Dämmstoff alle Funktionen gleichermaßen optimal abdeckt, weisen verschiedene Materialien unterschiedliche Vor- und Nachteile auf.

Nach Neroth et al. [NER11] lassen sich Dämmstoffe in anorganisch und organisch sowie weiter in synthetisch und natürlich unterteilen:

- Anorganisch synthetisch: Mineralfasern, wie Stein- oder Glaswolle.
- Anorganisch natürlich: Blähton.
- Organisch synthetisch: Kunststoffe wie Expandiertes Polystyrol (EPS), Extrudiertes Polystyrol (XPS) oder Polyurethan (PUR).
- Organisch natürlich: Naturdämmstoffe wie Holzfaser- oder Zellulosefaserdämmung.

Im Folgenden werden die Eigenschaften der gängigsten Dämmstoffe detaillierter beleuchtet:

Mineralwolle zeichnet sich durch gute Wärmedämmung, Unbrennbarkeit und guten Schallschutz aus. Sie kann beim Ein- und Ausbau Haut- und Atemwegsreizungen verursachen und während der Herstellung potenziell Schadstoffe freisetzen. Zudem neigt Mineralwolle bei Feuchtigkeit zum Aufquellen, wodurch sie an Dämmwirkung verlieren kann. [TRE23]

Polystyrol bietet eine höhere Wärmedämmleistung als Mineralwolle und ist leicht zu handhaben. Insbesondere extrudiertes Polystyrol ist wasserabweisend und behält seine Dämmwirkung auch bei Wasserkontakt bei. Polystyrol ist leicht entzündlich und setzt im Brandfall giftige Gase frei. Außerdem verursacht es Umweltbelastungen, da es auf fossilen Rohstoffen basiert, energieintensiv hergestellt wird und nur schwer recycelbar ist. Zudem ist es nicht biologisch abbaubar und trägt bei der Entsorgung zur Entstehung von Mikroplastik und CO<sub>2</sub>-Emissionen bei. [TRE23]

PUR-Schaum zeichnet sich durch eine ausgezeichnete Wärmedämmung bei geringer Dicke aus, was zu einer hohen Dämmleistung führt. Auch er ist wasserabweisend. Ähnlich wie Polystyrol sind seine entzündlichen Eigenschaften zu be-

achten. Zudem ist der Preis im Vergleich zu anderen Dämmstoffen höher, und es können nach der Installation flüchtige organische Verbindungen ausgasen. Auch PUR ist nicht biologisch abbaubar und verursacht – ähnlich wie Polystyrol – erhebliche Umweltbelastungen. Beide Materialien basieren auf fossilen Rohstoffen, erfordern eine energieintensive Herstellung und sind nur eingeschränkt recycelbar, sodass sie bei der Entsorgung problematisch bleiben. [TRE23]

Naturdämmstoffe, wie Holzfaser- oder Zellulosefaserdämmung, sind im Allgemeinen nachhaltiger und umweltfreundlicher als synthetische Alternativen. Viele Naturdämmstoffe zeichnen sich durch gute Schallabsorption und Atmungsaktivität aus, was die Feuchtigkeitsregulierung positiv beeinflusst. Poröse Naturdämmstoffe verlieren bei starkem Wasserkontakt ihre Dämmleistung, weshalb sie durch geeignete Maßnahmen, wie eine Dampfbremse, vor Feuchtigkeit geschützt eingebaut werden müssen. Im Vergleich zu synthetischen Dämmstoffen weisen sie oft eine geringere Dämmleistung auf und sind teurer. Zudem können bei einigen Materialien, wie Schafwolle, spezifische Unverträglichkeiten für Allergiker auftreten. [TRE23]

Abbildung 3.4 zeigt die Aufteilung des deutschen Dämmstoffmarktes nach Volumen für das Jahr 2021. Es wird deutlich, dass Mineralwolle mit über 50 % den größten Anteil ausmacht, gefolgt von organisch-synthetischen Dämmstoffen mit 34 %. Nachwachsende Dämmstoffe erreichen lediglich 6 %.

Abbildung 3.5 veranschaulicht den Bereich der Wärmeleitfähigkeit verschiedener Dämmstoffe. Organisch-synthetische Dämmstoffe, angeführt von PUR mit Werten zwischen  $0,02 \text{ W}/(\text{m K})$  und  $0,045 \text{ W}/(\text{m K})$ , weisen die geringsten Wärmeleitfähigkeiten und somit die besten Dämmleistungen auf. Mineralwolle liegt mit Werten zwischen  $0,03 \text{ W}/(\text{m K})$  und  $0,05 \text{ W}/(\text{m K})$  im Mittelfeld. Nachwachsende Dämmstoffe sind mit Werten von  $0,04 \text{ W}/(\text{m K})$  bis  $0,095 \text{ W}/(\text{m K})$  am schlechtesten in Bezug auf die Wärmeleitfähigkeit.

Eine besondere Art der Dämmung stellen Sandwichpaneele dar. Hierbei wird der Dämmstoff zwischen zwei Metallplatten verklebt [MÖL11]. Dies ermöglicht zusätzlich zur Dämmwirkung auch eine statische Anforderung zu erfüllen [MÖL11]. Sandwichpaneele kommen häufig im Hallenbau zum Einsatz. Sie bestehen vorwiegend aus Mineralwolle oder PUR [MÖL11; LAN10], wobei Mineralwolle ver-

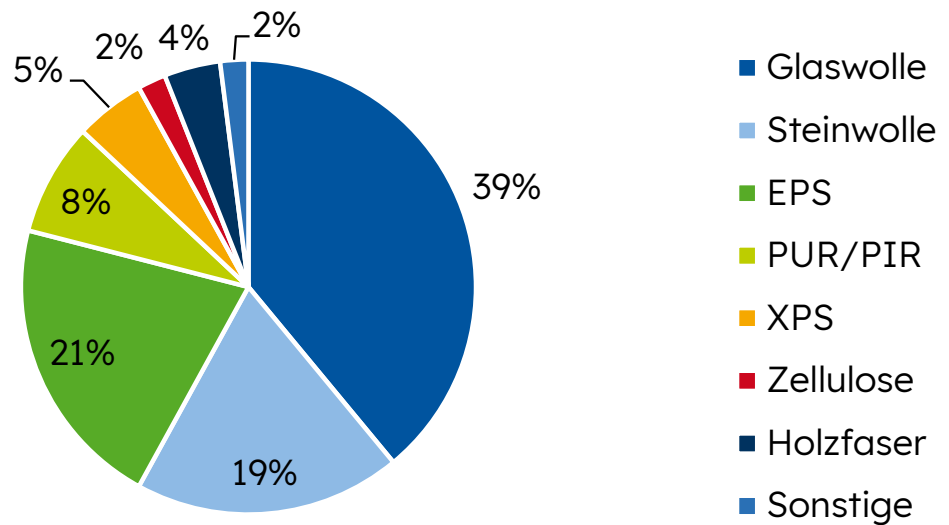


Abbildung 3.4.: Dämmstoffmarkt Deutschlands 2021 nach Volumen [TRE23]

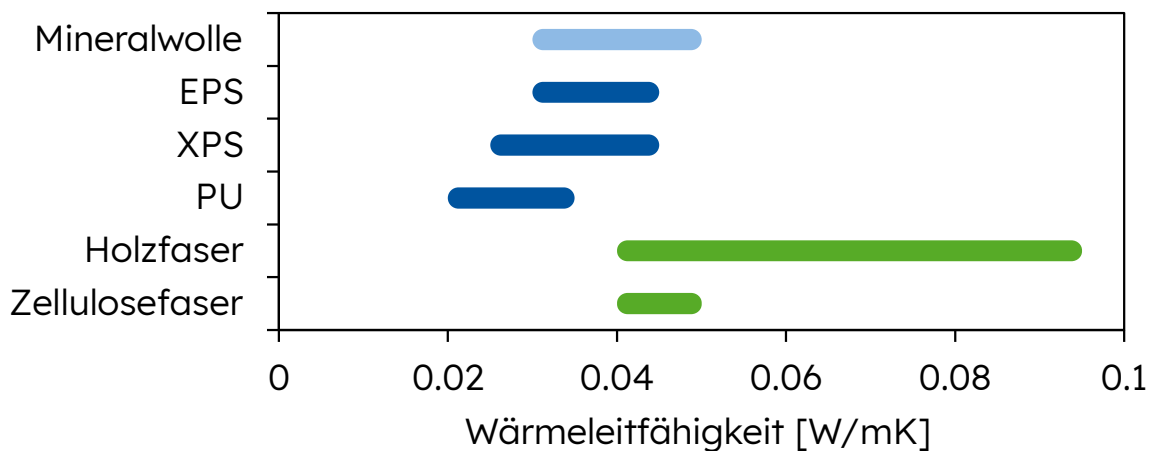


Abbildung 3.5.: Wärmeleitfähigkeit verschiedener Dämmstoffe [TRE23]

mehrt bei brandschutzrelevanten Bauteilen eingesetzt wird [MÖL11]. Ansonsten entfallen 90 % des Marktes auf PUR-Paneele [LAN10]. Ein wesentlicher Nachteil dieser Bauweise ist die schlechte Recyclierbarkeit, da der Verbund aus Metall und Dämmstoff durch die Verklebung nur mit großem Aufwand wieder getrennt werden kann. Im Gegensatz dazu zeigen neueste Entwicklungen im Bereich vollständig recycelbarer Sandwichpaneelle mit thermoplastischen Skins und Kern-

materialien, z. B. aus recyceltem Kunststoff, dass eine komplett stoffliche Wiederverwertung möglich ist. [MAN24a]

Eine neuere Entwicklung im Dämmstoffbereich sind Vakuumisulationspaneele (VIP). Ein VIP besteht aus einem hochporösen Kern (oft Kieselsäurepulver oder Glasfaser), der gasdicht eingeschweißt und evakuiert wird. Dadurch werden Wärmetransport durch Konvektion und Gaseinschluss praktisch eliminiert, was eine außerordentlich niedrige Wärmeleitfähigkeit zur Folge hat. [ALI24b] Mit typischen Wärmeleitungswerten um 0,002–0,008 W/(m·K) erreicht Vakuumdämmung eine bis zu fünf- bis zehnmal bessere Dämmleistung als herkömmliche Materialien [ALI24b; SPR17]. Der gewünschte Wärmeschutz kann somit mit deutlich geringerer Dämmdicke erzielt werden – in der Praxis genügen z. B. bereits 2 cm VIP, um die Dämmwirkung einer 20–25 cm dicken Mineralwolldämmung zu erreichen [SPR17]. Bei Verwendung eines anorganischen Kernmaterials (etwa pyrogene Kieselsäure) sind VIP nicht brennbar und enthalten keine toxischen Bestandteile [BOR23]. Diese Hochleistungs-dämmstoffe sind derzeit im Vergleich zu konventionellen Dämmstoffen noch sehr teuer in der Herstellung und Anschaffung [BOR23]. Die Verarbeitung erfordert besondere Sorgfalt, da bereits geringe Beschädigungen der Gasbarriere (z. B. Anbohren oder Riss der Folie) zum Verlust des Vakuums und damit zu einem drastischen Leistungsabfall führen. [ALI24b] Auch entstehen unvermeidbare Wärmebrücken an den Panelrändern und Stößen, was eine sorgfältige Detailplanung notwendig macht [SPR17]. Sie sind in der Praxis aktuell noch nicht weit verbreitet, deshalb fehlt es noch an langfristigen Praxiserfahrungen über die volle Nutzungsdauer [SPR17]. Zwar deuten Untersuchungen darauf hin, dass mit aktuellen VIP-Technologien eine Lebensdauer von 25 bis 50 Jahren erreichbar ist [SPR17], dennoch besteht eine gewisse Skepsis bezüglich der Alterungsbeständigkeit (z. B. langsames Eindringen von Gas durch die Barrierefolie über Jahrzehnte [BEE14]). Insgesamt stellen Vakuumisulationspaneele eine vielversprechende High-Tech-Lösung dar, um bei begrenztem Bau- raum höchste Dämmwirkung zu erzielen [BEE14].

### **3.4.2. Degradation der Dämmwirkung über die Lebensdauer**

Die Gebäudetechnik und die Gebäudehülle können während ihrer Lebensdauer an Effizienz einbüßen [NEG19]. Dies betrifft beispielsweise die Dämmung, die

über ihre Lebensdauer an Dämmwirkung verlieren kann. [NEG19; STA14].

Stazi et. al. [STA14] untersuchten Mineralwolldämmung und stellten eine Abnahme der Dämmwirkung von 9 % über 25 Jahre fest. Die Ursachen lagen in der Degradation der Glasfasern und des Bindemittels, die eine Verminderung der Hydrophobizität nach sich zog und damit zu einem erhöhten Feuchteeintrag und Wärmeleitfähigkeit führte [STA14].

Choi et al. [CHO18] untersuchten die Degradation von Polystyrol und PUR. Dabei wurde eine Abnahme der Dämmleistung von 25,8 % bis 27 % für Polystyrol sowie 22,5 % und 27,4 % für PUR über 5000 Tage festgestellt. Es ist hierbei anzumerken, dass die Startwerte dieser Dämmstoffe besser waren als die Herstellerangaben.

### **3.4.3. Fenster**

Fenster sind für den Wärmeschutz von Gebäuden von besonderer Bedeutung, da sie in der Vergangenheit trotz ihres vergleichsweise geringen Flächenanteils einen überproportional hohen Beitrag zu den Wärmeverlusten leisteten. Während opake Bauteile wie Wände und Dächer bereits seit Jahrzehnten kontinuierlich verbessert wurden, hat auch die Fenstertechnik erhebliche Fortschritte gemacht: von schwach dämmenden Einfachverglasungen hin zu modernen, hochleistungsfähigen Bauteilen mit sehr guten Wärmedämmeigenschaften. Ihre thermische Leistungsfähigkeit wird dabei insbesondere durch den Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Wert) bestimmt, der in den letzten Jahrzehnten erheblich gesenkt werden konnte [YAN15a; YU23; GRY13].

Der U-Wert ist die zentrale Kennzahl zur Bewertung der Wärmedämmung von Fenstern. Er beschreibt die Wärmemenge, die pro Quadratmeter Fläche und Kelvin Temperaturdifferenz durch ein Fenster verloren geht. Ein niedriger U-Wert steht somit für eine hohe Dämmwirkung und geringe Wärmeverluste [GRY13; CHE25].

Die Art der Verglasung bestimmt in besonderem Maße den U-Wert. Ältere Einfachverglasungen weisen U-Werte von etwa  $5 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$  auf, was zu erheblichen Wärmeverlusten und kalten Innenoberflächen führt. Mit der Einführung von Doppelverglasungen in den 1970er Jahren konnten die Wärmeverluste deutlich redu-

ziert werden. Typische U-Werte liegen hier bei rund 2,7 bis 3 W/(m<sup>2</sup> K). Moderne Wärmeschutzverglasungen, bei denen eine Low-E-Beschichtung aufgebracht und die Zwischenräume mit Edelgasen wie Argon gefüllt werden, erreichen nochmals deutlich bessere Werte [GRY13]. Zweifach-Wärmeschutzverglasungen liegen heute bei etwa 1,4 W/(m<sup>2</sup> K) und stellen damit den Standard bei energetischen Sanierungen dar [PRA21; DIN18b]. Im energieeffizienten Neubau sind Dreifachverglasungen verbreitet, die durch zwei beschichtete Zwischenräume und Edelgasfüllungen U-Werte zwischen 0,5 und 0,7 W/(m<sup>2</sup> K) erreichen [CHE25; DIN18b]. Neben einer besseren Wärmedämmung erhöhen sie auch die Innenoberflächentemperaturen und reduzieren so Zugluft und Kondensatbildung [GUN24]. Als innovative Weiterentwicklung gilt die Vakuumverglasung, bei der ein nahezu evakuierter Zwischenraum die Wärmeleitung und Konvektion minimiert. Experimentelle Untersuchungen zeigen, dass damit U-Werte bis etwa 0,4 W/(m<sup>2</sup> K) im Scheibenzentrum möglich sind, wodurch vergleichbare oder sogar bessere Dämmleistungen als bei Dreifachverglasungen bei geringerer Dicke erzielt werden können [AGU20].

Neben dem U-Wert ist der Gesamtenergiedurchlassgrad (g-Wert) eine weitere entscheidende Kenngröße für die energetische Beurteilung von Fenstern. Er beschreibt den Anteil der einfallenden solaren Strahlungsenergie, der durch das Fenster nach innen gelangt. Ein hoher g-Wert erhöht die solaren Wärmegewinne, was im Winter erwünscht ist, im Sommer jedoch zu Überhitzungen führen kann. [GUN24] Moderne Zweifach-Wärmeschutzverglasungen weisen g-Werte von etwa 0,6 auf, während Dreifachverglasungen typischerweise zwischen 0,45 und 0,55 liegen [DIN18b].

Auch das Rahmenmaterial beeinflusst die Gesamtleistung eines Fensters maßgeblich. Holz- und Kunststoffrahmen weisen aufgrund ihrer geringen Wärmeleitfähigkeit günstige U-Werte auf, während Aluminiumrahmen ohne zusätzliche Maßnahmen erhebliche Wärmeverluste verursachen. Moderne Aluminiumprofile werden deshalb mit thermischen Trennungen versehen, welche die Wärmeleitung zwischen innen und außen unterbrechen und so den U-Wert deutlich verbessern. Hybridlösungen wie Holz-Alu-Kombinationen oder faserverstärkte Kunststoffe verbinden hohe Stabilität mit sehr guter Wärmedämmung und tragen ebenfalls zur Optimierung des Gesamtwerts bei [KIM19].

Für die im weiteren Verlauf dieser Arbeit betrachteten Gebäude ist festzuhalten, dass diese mit Zwei- bzw. Dreifachverglasungen ausgestattet sind. Damit bilden sie den aktuellen Stand der Technik ab, sodass die erzielten Ergebnisse sowohl die energetischen als auch die komfortrelevanten Eigenschaften moderner Fenster realistisch widerspiegeln.

### **3.5. Cluster 5: Systemintegration in Quartiersenergiekonzepte**

Die zuvor beschriebenen Technologien entfalten ihr volles Potenzial erst im systemischen Zusammenspiel. Dieses Cluster befasst sich mit der übergeordneten Systemintegration auf Quartiersebene, wobei Synergien zwischen Wärmeerzeugung, -verteilung, -speicherung und elektrischen Energiesystemen eine zentrale Rolle spielen. Insbesondere die Entwicklung von Wärmenetzen und deren Integration mit PV, Wärmepumpen und Speichern steht im Fokus des Clusters.

Ein bedeutender Aspekt ist die schrittweise Weiterentwicklung von Nahwärmenetzen, die sich in fünf sogenannte Generationen unterteilen lassen [LUN14; DAN24; GJO23]:

- 1. Generation:  
Dampfnetze mit sehr hohen Temperaturen (120 °C bis 200 °C), historisch in industriellen oder urbanen Kontexten verwendet.
- 2. Generation:  
Heißwassernetze mit 90 °C bis 120 °C, beispielsweise klassische Fernwärme aus Kraft-Wärme-Kopplung (KWK).
- 3. Generation:  
Verbesserte isolierte Netze mit Vorlauftemperaturen von 70 °C bis 90 °C, meist mit zentralen Gaskesseln oder Biomasseanlagen.
- 4. Generation:  
Niedertemperaturnetze mit 40 °C bis 70 °C, geeignet für erneuerbare Wärmeerzeuger und zur Einspeisung von Abwärme.
- 5. Generation (5GDHC):  
Kalte Nahwärmenetze mit Temperaturen zwischen 10 °C bis 30 °C, bidirektional, dezentral geregelt, mit der Möglichkeit zur gleichzeitigen Wärme- und Kälte-

tebereitstellung.

Die 5. Generation der Wärmenetze (5GDHC = 5th Generation District Heating and Cooling) stellt einen Paradigmenwechsel dar. Diese Netze arbeiten auf sehr niedrigen, thermodynamisch günstigen Temperaturniveaus und setzen auf dezentrale Wärmepumpen zur Hebung des Temperaturniveaus beim Verbraucher. Sie ermöglichen sowohl die Einspeisung als auch Entnahme von Energie. So können Wärmequellen wie Rechenzentren, PV -Überschussstrom (via Heizstab/Wärmepumpe) oder Geothermie flexibel eingebunden werden. [BUF19; GJO23]

Besondere Vorteile bieten 5GDHC-Systeme insbesondere im Kontext von Quartieren. Sie ermöglichen eine kombinierte Wärme- und Kälteversorgung aus demselben Netz und zeichnen sich durch eine höhere Energieeffizienz aus, da die Netzverluste im Vergleich zu Systemen mit höheren Temperaturen deutlich geringer ausfallen. Darüber hinaus erlauben sie die einfache Integration lokaler erneuerbarer Energiequellen wie Geothermie, Solarthermie oder Abwärme. Durch den Einsatz elektrisch betriebener Wärmepumpen wird zudem eine enge Kopplung mit dem Stromsektor ermöglicht. Ergänzend tragen thermische und elektrische Speicher zur Flexibilisierung des Gesamtsystems bei.

Zur konkreten Auslegung und Bewertung solcher Systeme bieten sich insbesondere multikriterielle, gekoppelte thermisch-elektrische Optimierungsmodelle an [JIA22], wie sie auch im Kontext zukünftiger Niedertemperatur-Fernwärmesysteme diskutiert werden [SCH17]. Im Rahmen dieser Arbeit wird für die Quartiere auf 5GDHC-Systeme gesetzt. Deren Optimierung erfolgt mithilfe entsprechender gekoppelter thermisch-elektrischer Modelle.

## **4. Modellierungsansätze zur dynamischen Lebenszyklusanalyse**

Dieses Kapitel stellt zunächst die Modellierungsansätze vor, mit denen die Emissionen des Stromsektors zeitlich aufgelöst betrachtet werden, um die Haupthypothesen H1 und H2 zu prüfen. Anschließend werden weitere Modellierungsansätze erläutert, die zur Untersuchung der übrigen Haupthypothesen dienen.

### **4.1. Modellierungsansätze zur zeitlichen Auflösung von Stromsektoremissionen**

Für die Haupthypothesen H1 und H2 werden Modellierungsansätze benötigt, um dynamische elektrischer Energiemix-Daten abzubilden. Im Kapitel 2 wurde anhand einer umfassenden Literaturrecherche dargelegt, dass bestehende Normen wie die DIN EN 15978 sowie viele Studien auf durchschnittlichen, statischen elektrischen Energiemix-Werten basieren und damit zeitlich differenzierende Betrachtungen unzureichend abbilden. Aufbauend auf diesen Grundlagen stellt dieses Kapitel geeignete methodische Ansätze vor, um dynamische elektrischer Energiemix-Daten in LZA von Gebäuden zu integrieren. Im Anschluss werden die gewählten Modellierungsansätze und Annahmen zur Analyse der Effekte marginaler Emissionen, klimatischer Veränderungen, der Degradation von Gebäudetechnik und -hülle sowie des Wiederverwertungspotenzials erläutert.

Die in dieser Arbeit betrachteten Modellierungsansätze sind in Abbildung 4.1 zusammengefasst dargestellt. Auf der untersten Ebene der Abbildung wird die zeitliche Auflösung der Stromsektoremissionen im Verlauf eines Jahres variiert. Diese kann entweder konstant über das Jahr hinweg angenommen werden („jährlich“) oder stündlich differenziert erfolgen („stündlich“).

Auf der mittleren Ebene wird zwischen zwei Szenarien unterschieden. Einem Fall,

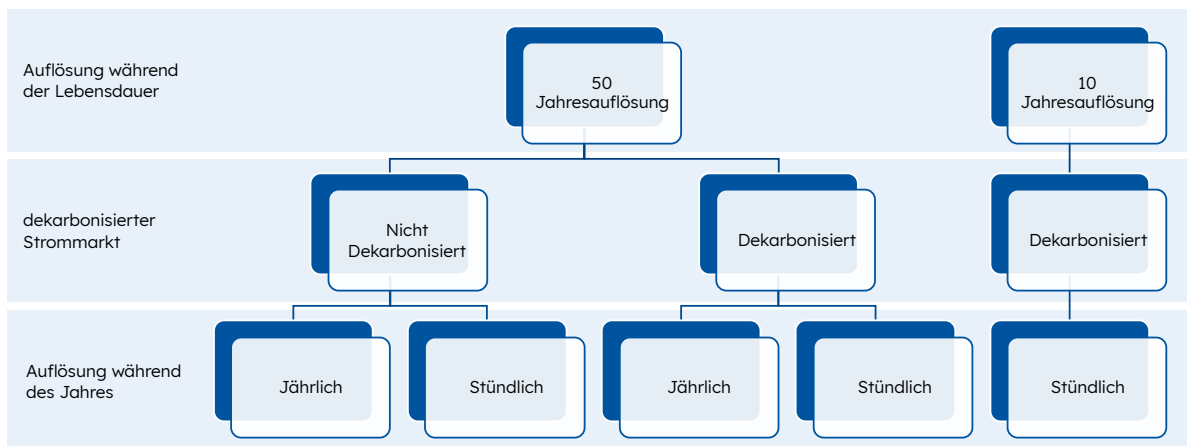


Abbildung 4.1.: Überblick der Kategorien für die verschiedenen Modellierungsansätze

in dem sich der Stromsektor über den Betrachtungszeitraum hinweg dekarbonisiert und einem, in dem keine Dekarbonisierung stattfindet. Dekarbonisierung des Stromsektors bedeutet hierbei, dass der Anteil fossiler Brennstoffe an der Erzeugung elektrischer Energie im Laufe der Zeit deutlich reduziert und zunehmend durch erneuerbare Energien ersetzt wird – mit dem Ziel, die CO<sub>2</sub>-Emissionen des Sektors auf nahe null zu senken.

Auf der obersten Ebene wird die zeitliche Auflösung des gesamten Betrachtungszeitraums von 50 Jahren variiert. Dabei werden zwei Ansätze unterschieden: Zum einen eine grobe Auflösung, bei der ein einziges repräsentatives Jahr für den gesamten Zeitraum verwendet wird (50-Jahresauflösung), und zum anderen eine feinere Auflösung, bei der der Zeitraum in fünf Dekaden unterteilt wird (10-Jahresauflösung). In der letzteren Variante wird jeweils ein repräsentatives Jahr pro Dekade berücksichtigt.

Insgesamt ergeben sich dadurch vier Betrachtungsfälle bei der 50-Jahresauflösung sowie ein Fall bei der 10-Jahresauflösung. Letzterer berücksichtigt ausschließlich das Szenario mit einem dekarbonisierenden Stromsektor mit stündlicher Auflösung, da bei stündlicher Auflösung die stärksten und aussagekräftigsten Effekte erwartet werden.

Damit sind verschiedenen betrachteten Modellierungsansätze:

- 50-Jährlich-Konstant (50-J-K)

1 repräsentativer Jahresdatenpunkt zur Simulation eines 50 jährigen Betrachtungszeitraum, die Emissionen sind über das Jahr konstant und der Stromsektor wird nicht dekarbonisiert. (Siehe Abbildung 4.2 50-J-K)

- 50-Stündlich-konstant (50-S-K)  
1 repräsentativer Jahresdatenpunkt zur Simulation eines 50 jährigen Betrachtungszeitraum, die Emissionen haben für jede Stunde im Jahr einen Wert und der Stromsektor wird nicht dekarbonisiert. (Siehe Abbildung 4.2 50-S-K)
- 50-Jährlich-Dekarbonisiert (50-J-D)  
1 repräsentativer Jahresdatenpunkt zur Simulation eines 50 jährigen Betrachtungszeitraum, die Emissionen sind über das Jahr konstant und der Stromsektor wird dekarbonisiert. (Siehe Abbildung 4.2 50-J-D)
- 50-Stündlich-Dekarbonisiert (50-S-D)  
1 repräsentativer Jahresdatenpunkt zur Simulation eines 50 jährigen Betrachtungszeitraum, die Emissionen haben für jede Stunde im Jahr einen Wert und der Stromsektor wird dekarbonisiert. (Siehe Abbildung 4.2 50-S-D)
- 10-Stündlich-Dekarbonisiert (10-S-D)  
1 repräsentativer Jahresdatenpunkt für jeden 10 Jahreszeitraum eines 50 jährigen Betrachtungszeitraums, die Emissionen haben für jede Stunde im Jahr einen Wert und der Stromsektor wird dekarbonisiert. (Siehe Abbildung 4.2 10-S-D)

#### **4.1.1. 50-jährlich-konstant (50-J-K)**

Dieser Modellierungsansatz stellt aktuell den Standard bei der LZA dar (vgl. Kapitel 2.1.2). Es wird ein Jahr mit einem über das Jahr konstanten Emissionsfaktor für das heutige Elektrizitätsnetz betrachtet. Dementsprechend wird entweder ein Wert für die Interaktion mit dem Elektrizitätsnetz aus Fachpublikationen oder aus LZA-Datenbanken, wie der ÖKOBAUDAT, entnommen oder alternativ der Mittelwert stündlicher Daten herangezogen (vgl. Kapitel 2.2.2). Dieser Emissions-

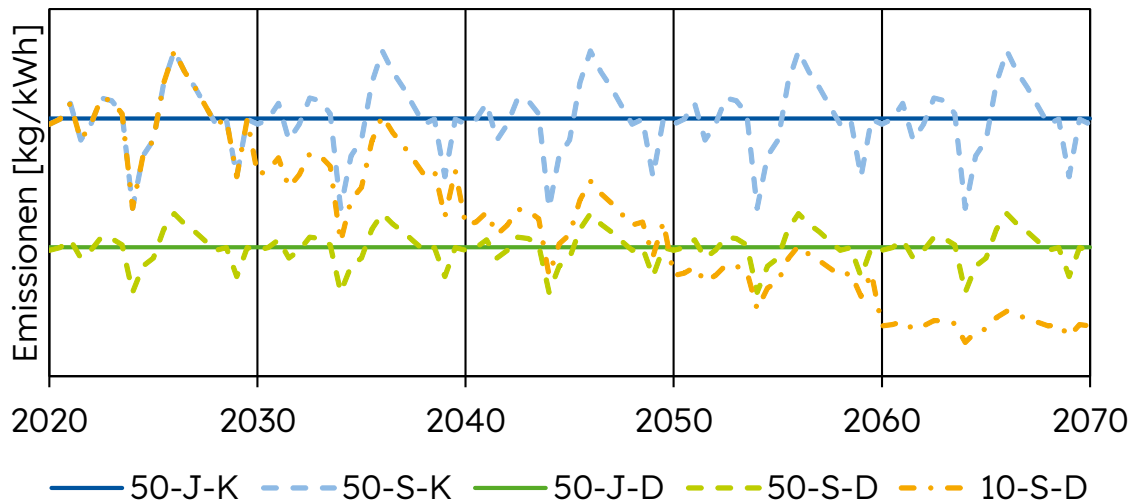


Abbildung 4.2.: Visualisierung der verschiedenen Modellierungsansätze für den Stromsektor

wert ( $e$ ) wird dann mit jeder eingekauften ( $E_{\text{einkauf}}$ ) oder verkauften Energiemenge ( $E_{\text{verkauf}}$ ) an elektrischer Energie multipliziert und über alle Zeitschritte ( $T$ ) des Jahres aufsummiert und mit der Anzahl an Jahren im Betrachtungszeitraum ( $J$ ) multipliziert, um die gesamten Betriebsemissionen ( $Em_{\text{Betrieb}}$ ) zu ergeben:

$$Em_{\text{Betrieb}} = e \cdot J \cdot \sum_{t=1}^T (E_{\text{einkauf}}(t) - E_{\text{verkauf}}(t)) \quad (4.1)$$

#### 4.1.2. 50-stündlich-konstant (50-S-K)

Bei diesem Modellierungsansatz wird ein Jahr mit einem über das Jahr stündlich schwankenden Emissionsfaktor für das heutige Elektrizitätsnetz betrachtet. Dementsprechend werden hier stündliche Daten für das heutige Elektrizitätsnetz benötigt. Diese können beispielsweise dem Agorameter entnommen werden (vgl. Kapitel 2.2.2). Diese stündlichen Emissionswerte ( $e$ ) werden dann mit der zum gleichen Zeitpunkt eingekauften ( $E_{\text{einkauf}}$ ) oder verkauften Energiemenge ( $E_{\text{verkauf}}$ ) an elektrischer Energie multipliziert und über alle Zeitschritte ( $T$ ) aufsummiert und mit der Anzahl an Jahren im Betrachtungszeitraum ( $J$ ) multipliziert, um die gesamten Betriebsemissionen ( $Em_{\text{Betrieb}}$ ) zu ergeben:

$$Em_{\text{Betrieb}} = J \cdot \sum_{t=1}^T (E_{\text{einkauf}}(t) - E_{\text{verkauf}}(t)) \cdot e(t) \quad (4.2)$$

### 4.1.3. 50-jährlich-dekarb (50-J-D)

Bei diesem Modellierungsansatz wird ein Jahr mit einem über das Jahr konstanten Emissionsfaktor für ein sich über den Betrachtungszeitraum dekarbonisierendes Elektrizitätsnetz betrachtet. Der zugrunde liegende Emissionsfaktor kann entweder aus der Literatur oder aus LZA-Datenbanken wie der ÖKOBAUDAT entnommen werden. Alternativ wird er aus stündlichen Daten für ein oder mehrere Jahre berechnet (vgl. Kapitel 2.2.2). Liegen Daten für mehrere Jahre vor, können fehlende Werte interpoliert und anschließend über alle Jahre des Betrachtungszeitraums ( $J$ ) und Zeitschritte ( $T$ ) gemittelt werden, sodass sich ein repräsentativer Emissionsfaktor  $\bar{e}$  ergibt:

$$\bar{e} = \frac{1}{J \cdot T} \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T e(t,j) \quad (4.3)$$

Dieser gemittelte Emissionsfaktor wird anschließend mit den eingekauften ( $E_{\text{einkauf}}$ ) bzw. verkauften Energiemengen ( $E_{\text{verkauf}}$ ) multipliziert. Die Summe über alle Zeitschritte, multipliziert mit der Anzahl an Jahren im Betrachtungszeitraum ( $J$ ), liefert die gesamten Betriebsemissionen  $Em_{\text{Betrieb}}$ :

$$Em_{\text{Betrieb}} = J \sum_{t=1}^T \bar{e} \cdot (E_{\text{einkauf}}(t) - E_{\text{verkauf}}(t)) \quad (4.4)$$

### 4.1.4. 50-stündlich-dekarb (50-S-D)

Bei diesem Modellierungsansatz wird ein Jahr mit einem über das Jahr stündlich schwankenden Emissionsfaktoren für ein sich über den Betrachtungszeitraum dekarbonisierendes Elektrizitätsnetz betrachtet. Die hierfür erforderlichen Stundendaten können z. B. Blanke et al. [BLA26] entnommen werden (vgl. Kapitel 2.2.2). Liegen stündliche Daten für mehrere Jahre vor, werden fehlende Werte ggf. interpoliert und anschließend für jede Stunde  $\dagger$  des Jahres über den Betrachtungszeitraum ( $J$ ) gemittelt werden, sodass sich ein repräsentativer Emissionsfaktor  $\bar{e}$  ergibt:

tungszeitraum ( $J$ ) gemittelt. Dadurch ergibt sich ein repräsentativer stündlicher Emissionsfaktor  $\bar{e}(t)$ :

$$\bar{e}(t) = \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J e(t, j) \quad (4.5)$$

Damit ergeben sich die gesamten Betriebsemissionen  $Em_{\text{Betrieb}}$  durch Multiplikation von  $\bar{e}(t)$  mit den stündlichen Energiesalden und aufsummiert über alle Stunden ( $T$ ), skaliert mit der Anzahl der Jahre  $J$ :

$$Em_{\text{Betrieb}} = J \cdot \sum_{t=1}^T (E_{\text{einkauf}}(t) - E_{\text{verkauf}}(t)) \cdot \sum_{j=1}^J \frac{e(t, j)}{J} \quad (4.6)$$

#### 4.1.5. 10-stündlich-dekarb (10-S-D)

In diesem Modellierungsansatz wird ein Jahr stellvertretend für 10 Jahre des gesamten Betrachtungszeitraums betrachtet. Dadurch decken fünf solcher Zeitabschnitte insgesamt die 50 Jahre des gesamten Zeitraums ab. Während des Betrachtungszeitraums dekarbonisiert das Elektrizitätsnetz und es werden im Jahr stündlich schwankenden Emissionsfaktoren betrachtet. Für die Modellierung werden stündliche Emissionsfaktoren eines dekarbonisierenden Elektrizitätsnetzes für mehrere Jahre benötigt. Solche Datensätze können beispielsweise Seckinger et al. [SEC21] oder Blanke et al. [BLA26] entnommen werden (vgl. Kapitel 2.2.2). Um langfristige Entwicklungen abzubilden, werden die stündlichen Daten jeweils über 10-Jahresintervalle gemittelt. Dadurch ergibt sich für jede Stunde  $t$  ein repräsentativer Emissionsfaktor, der die Variation innerhalb des jeweiligen Jahrzehnts berücksichtigt.

Diese stündlichen Mittelwerte  $\bar{e}(t, i)$  werden dann mit der zum gleichen Zeitpunkt eingekauften ( $E_{\text{einkauf}}$ ) oder verkauften Energiemenge ( $E_{\text{verkauf}}$ ) an elektrischer Energie multipliziert. Die Summe über alle Zeitschritte, multipliziert mit der Anzahl an Jahren im Betrachtungszeitraum ( $J$ ), liefert die gesamten Betriebsemissionen  $Em_{\text{Betrieb}}$ :

$$Em_{\text{Betrieb}} = J \cdot \sum_{i=1}^{\frac{J}{10}} \frac{10}{J} \cdot \sum_{t=1}^J (E_{\text{einkauf}}(t, i) - E_{\text{verkauf}}(t, i)) \cdot \bar{e}(t, i) \quad (4.7)$$

mit

$$\bar{e}(t, i) = \sum_{j=(i-1) \cdot 10}^{i \cdot 10} \frac{e(t, j)}{10} \quad (4.8)$$

wobei  $i$  das betrachtete Jahrzehnt kennzeichnet.

## 4.2. Modellierungsansätze zur Untersuchung der Haupthypothesen H3 bis H6

Neben der zeitlichen Auflösung über die Jahre und den Betrachtungszeitraum sowie der Dekarbonisierung des Stromsektors können weitere Faktoren für eine DLZA berücksichtigt werden (vgl. Kapitel 2.1.2). Einige dieser Faktoren dienen als Grundlage zur Untersuchung der Haupthypothesen H3 bis H6.

Zunächst wird ein Modellierungsansatz zur Berücksichtigung marginaler Emissionen vorgestellt, die als Grundlage für die Untersuchung ihres Einflusses auf die Dämmstärke im Rahmen der Haupthypothese H3 dient. Anschließend wird beschrieben, wie der Wetteinfluss methodisch abgebildet werden kann, um seinen Einfluss auf Dämmstärke und Emissionen im Kontext der Haupthypothese H4 zu prüfen. Darauf folgt die Darstellung eines Modellierungsansatzes zur Abbildung der Degradation von Gebäudetechnik und Dämmstoffen und deren Einfluss auf die Dämmstärke im Rahmen der Haupthypothese H5. Abschließend wird ein Modellierungsansatz zur methodischen Erfassung des Wiederverwertungspotenzials vorgestellt, mit dem dessen Einfluss auf Emissionen und Dämmstärke im Rahmen der Haupthypothese H6 analysiert werden kann.

### 4.2.1. Marginale Emissionen

Neben den durchschnittlichen Emissionen können auch marginale Emissionen berücksichtigt werden. Diese beziehen sich nicht auf den gesamten Kraftwerkspark, sondern ausschließlich auf das jeweils bestimmende Grenzkraftwerk. Die in Kapitel 4.1 erläuterten Modellierungsansätze werden hierfür analog angewendet,

jedoch unter Verwendung marginaler (Alternativszenario) statt durchschnittlicher Emissionswerte (Ausgangsszenario) des Stromsektors. In dieser Arbeit wird dieser Effekt auf Basis der in Blanke et al. [BLA26] vorgestellten Daten analysiert (vgl. Kapitel 2.2.2) und den Ergebnissen mit durchschnittlichen Emissionswerten gegenübergestellt.

### 4.2.2. Wettereinfluss

Neben Veränderungen im Stromsektor kann sich auch das Klima über den Betrachtungszeitraum infolge des Klimawandels ändern. Dadurch beeinflussen steigende Temperaturen sowohl den Bedarf an Heiz- und Kühlenergie als auch den Ertrag erneuerbarer Energien. In dieser Arbeit wird der Einfluss des RCP-Szenarios 4.5 (vgl. Kapitel 2.5) auf den Heiz- und Kühlenergiebedarf sowie den PV-Ertrag untersucht. Im Ausgangsszenario wird das Wetter des Jahres 2020 herangezogen, während im Alternativszenario das über die gesamte Betrachtungsdauer durchschnittliche Klima sowie die entsprechenden PV-Erträge berücksichtigt werden. Hierzu werden die thermischen Lasten in 10-Jahres-Schritten berechnet und anschließend als durchschnittliche Werte entweder über den gesamten 50-jährigen Betrachtungszeitraum oder getrennt für jedes 10-Jahres-Intervall im stündlich-dekarbonisierten Modellierungsansatz berücksichtigt. Die erforderlichen Wetterdaten, wie beispielsweise die Temperatur zur Bestimmung des Temperatureinflusses auf die Luft-Wasser-Wärmepumpe, werden ebenfalls über den gesamten Betrachtungszeitraum von 50 Jahren bzw. intervallweise über 10 Jahre gemittelt.

### 4.2.3. Degradation der Gebäudetechnik und Gebäudehülle

Zur Abbildung der Effizienzverluste von Gebäudetechnik und Gebäudehülle über die Lebensdauer wird in dieser Arbeit ein einheitliches Modell verwendet. Die mittlere Degradation in einem Zeitraum  $[\dagger_{\text{Start}}, \dagger_{\text{Ende}}]$  wird als diskreter Mittelwert der Restfaktoren  $(1-r)^\dagger$  berechnet:

$$\bar{r}(\dagger_{\text{Start}}, \dagger_{\text{Ende}}) = \frac{(1-r)^{\dagger_{\text{Start}}} - (1-r)^{\dagger_{\text{Ende}}}}{(\dagger_{\text{Ende}} - \dagger_{\text{Start}}) \cdot r} \quad (4.9)$$

Dieses Modell ermöglicht eine konsistente Abbildung von Zeiträumen unter-

schiedlicher Länge (z. B. 10, 20 oder 50 Jahre).

Bei der betrachteten PV-Anlage wird im Gegensatz zur Lebensdauer des Gebäudes von einer Betriebsdauer von 20 Jahren ausgegangen. Nach Ablauf dieser Zeit wird die Anlage ersetzt, sodass im gesamten Betrachtungszeitraum von 50 Jahren zwei vollständige 20-Jahres-Perioden und eine zusätzliche 10-Jahres-Periode berücksichtigt werden. Da PV-Anlagen über die Zeit an Leistung verlieren, wird in dieser Arbeit eine jährliche Degradationsrate ( $r$ ) von 1%/a angesetzt, basierend auf typischen Werten aus Kapitel 3.1.2. Zur Berücksichtigung dieser Degradation wird der Ertrag mit der nach Gleichung 4.9 berechneten mittleren Degradation multipliziert.

Für die Wärmepumpen wird eine Degradationsrate ( $r$ ) von ebenfalls 1%/a angenommen (vgl. Kapitel 3.1.1). Der Ansatz ist analog zu dem der PV-Anlage, wobei hier der COP und EER über die Zeit angepasst werden. Dazu wird der ursprüngliche Wert jeweils mit der gemäß Gleichung 4.9 berechneten mittleren Degradation multipliziert.

Bei der Dämmung wird eine Degradationsrate ( $r$ ) von 0,4%/a angesetzt (vgl. Kapitel 3.4.2), basierend auf typischen Werten für Mineralwolle, die den größten Marktanteil aufweist (vgl. Kapitel 3.4.1). Die Heiz- und Kühllast wird dabei einer um die Degradation reduzierten effektiven Dämmdicke ( $d_{\text{neu}}$ ) zugeordnet, die sich aus der ursprünglichen Dämmdicke ( $d_{\text{alt}}$ ) und der mittleren Degradation ergibt:

$$d_{\text{neu}} = d_{\text{alt}} \cdot \bar{r}(t_{\text{Start}}, t_{\text{Ende}}) \quad (4.10)$$

Der Betrachtungszeitraum umfasst entweder die gesamten 50 Jahre (für Modellierungsansätze mit 50-Jahresauflösung) oder die jeweiligen Intervalle von 10 Jahren (für die 10-Jahresauflösung).

Im Ausgangsszenario wird die Systemperformance ohne Degradation betrachtet, während im Alternativszenario die beschriebenen Degradationsraten für PV-Anlage, Wärmepumpe und Dämmung berücksichtigt werden.

#### **4.2.4. Wiederverwertungspotential**

Die Abschätzung des Potenzials zur Wiederverwertung von Komponenten der Gebäudehülle und Gebäudetechnik ist mit Unsicherheiten behaftet, da sich die Recyclingtechnologien und auszutauschenden Komponenten während des Betrachtungszeitraums weiterentwickeln können. Daher wird in dieser Arbeit neben einem Ausgangsszenario, in dem das Wiederverwertungspotenzial berücksichtigt wird, auch ein Alternativszenario betrachtet, in dem dieses Potenzial nicht genutzt werden kann (vgl. Kapitel 2.1.4). Methodisch wird dies dadurch abgebildet, dass in letzterem Fall die Phase D der LZA vernachlässigt wird (vgl. Kapitel 2.1.1). Die in Kapitel 5.2.2 angegebenen Emissionsdaten für Gebäudetechnik und Dämmung werden deshalb in den entsprechenden Tabellen jeweils sowohl mit als auch ohne Phase D ausgewiesen.

## **5. Optimierung von Gebäuden und Quartieren auf LZA-Basis**

Die Optimierung von Gebäuden und Quartieren auf LZA-Basis erfordert zunächst eine konsistente Datengrundlage. Hierfür werden Datensätze zu Wetter, photovoltaischer Stromerzeugung, Emissionen des Elektrizitätsmarktes sowie Lastprofilen der betrachteten Einzelgebäude und Quartiere erstellt und zu strukturierten Datengruppen zusammengeführt. Diese Datengruppen unterscheiden zwischen einem Ausgangsszenario und einem Alternativszenario, die jeweils eine Forschungshypothese oder eine vereinfachende Annahme abbilden.

Im nächsten Schritt erfolgt die Optimierung mit dem Ziel, die Gesamtemissionen – bestehend aus betriebsbedingten Emissionen sowie den herstellungsbedingten Emissionen der Dämmung und Gebäudetechnik – für verschiedene gebäudetechnische Varianten zu minimieren. Hierzu wird das MILP-Modell aufgesetzt und beschrieben, das die Auswahl zwischen unterschiedlichen Dämmstärken und Varianten der Gebäudetechnik ermöglicht.

Anschließend werden die Ergebnisse hinsichtlich Emissionen, Dämmstärke und Speichergröße ausgewertet. Abbildung 5.1 veranschaulicht den methodischen Ablauf zur Untersuchung der Forschungshypothesen.

Aus der dargestellten Methodik ergibt sich zugleich die Struktur dieses Kapitels: Die einzelnen Schritte werden den entsprechenden Phasen zugeordnet und in den folgenden Abschnitten detailliert erläutert.

### **5.1. Erstellung von Last-, Erzeugungs- und Umfeldprofilen**

In diesem Kapitel wird die Erzeugung der verwendeten Profile und Lastgänge behandelt. Dazu zählen Wetterprofile, thermische Lastprofile für Gebäude und Quartiere sowie Energieerzeugung durch PV und Stromsektoremissionen.

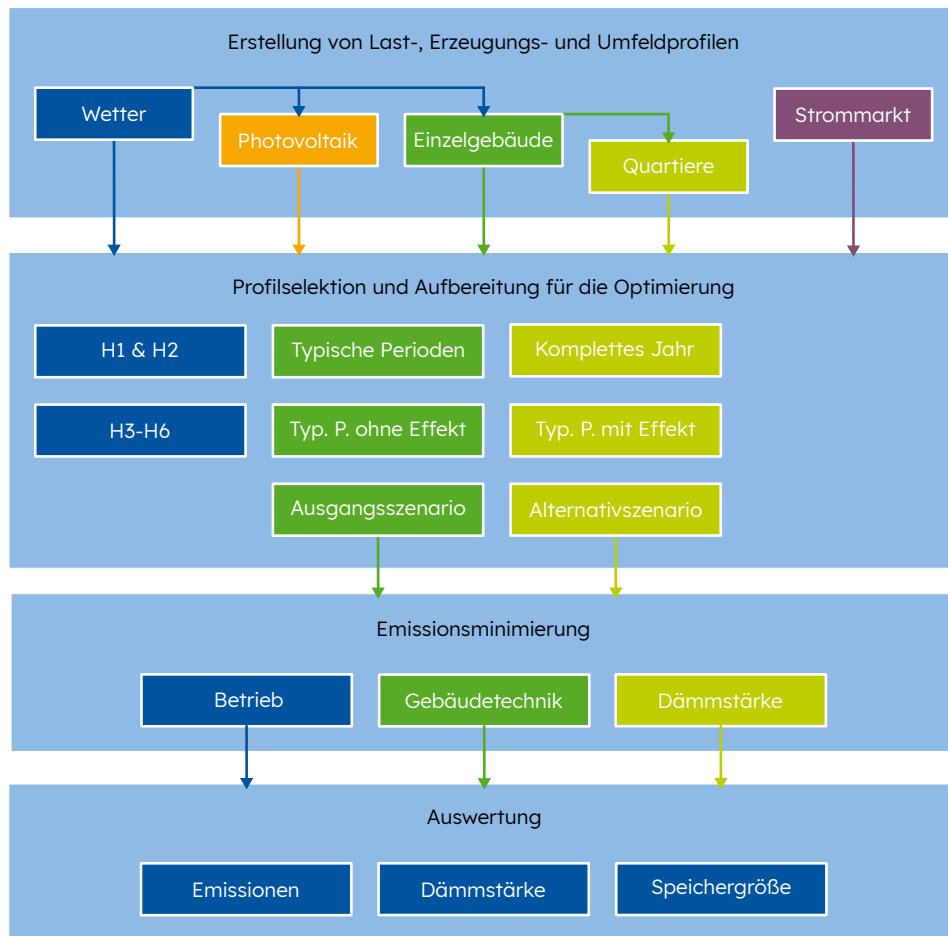


Abbildung 5.1.: Methodik zur Untersuchung der Forschungshypothesen (Typ. P. = Typische Perioden)

### 5.1.1. Wetterdaten

Für die energetische Bewertung wird ein zukünftiger Konzentrationspfad gemäß dem RCP4.5 herangezogen, der ein mittleres Emissionsszenario mit moderaten Klimaschutzmaßnahmen beschreibt (vgl. Kapitel 2.5). Untersucht wird der Zeitraum von 2020 bis 2060 in 10-Jahres-Schritten. Die Wahl des RCP4.5 erlaubt eine realistische Abbildung möglicher klimatischer Veränderungen, ohne Extremannahmen wie im RCP8.5 zu treffen. Somit können mögliche Trends in der energetischen Gebäudebelastung im Kontext realistischer Klimapolitik abgeschätzt werden.

Als Standorte werden Köln, München, Hamburg und Potsdam bei Berlin betrach-

tet. Diese Städte gehören zu den bevölkerungsreichsten in Deutschland und sind geografisch gut verteilt, um unterschiedliche klimatische Bedingungen von Nord bis Süd sowie West bis Ost abzudecken [DES19]. Die Wetterdaten basieren auf der Meteonorm-Datenbank [MET23] und beinhalten typische meteorologische Parameter für die jeweiligen Szenarien. Die Erdoberflächentemperaturen für die verschiedenen Standorte werden Xing et al. [XIN14] entnommen. Die Wärmeleitfähigkeit wird für alle Standorte zu  $2,1 \text{ W}/(\text{m K})$  und die Wärmekapazität zu  $2100 \text{ kJ}/(\text{m}^3 \text{ K})$  angenommen [NOR24].

### 5.1.2. Gebäudelastprofile

Für den Vergleich der verschiedenen Ansätze werden die thermischen Gebäude-lasten exemplarisch für vier unterschiedliche Gebäudetypen berechnet:

- Einfamilienhaus
- Bürogebäude
- Gewerbehalle
- Bildungsgebäude

Zur Analyse der Einflussfaktoren auf die Gebäudelasten wird eine systematische Sensitivitätsanalyse durchgeführt. Dabei werden für jeden Gebäudetyp die folgenden Parameter variiert, die sich maßgeblich auf die energetische Leistungsfähigkeit auswirken:

- Fensterverglasung:  
Zwei Varianten: Zweifachverglasung ( $U_w$ -Wert:  $1,4 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ , g-Wert: 0,67) und Dreifachverglasung ( $U_w$ -Wert:  $0,7 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ , g-Wert: 0,53) (vgl. Kapitel 3.4.3).
- Fensteranteil:  
Zwei Varianten: eine Referenz mit Standardfensterfläche der unten angegebenen Geometrien sowie ein Szenario mit verdoppelter Fensterfläche, angelehnt an Hausladen et al. [HAU14]. Die bewusste Wahl eines stark kontrastierenden Szenarios ermöglicht eine deutliche Quantifizierung des Einflusses. Ein vergleichbares Vorgehen wird auch in anderen Studien zur energetischen Sensitivitätsanalyse angewendet [SIN22; SAN12].
- Wärmerückgewinnung:

Zwei Varianten: reine Abluftanlage und Zu-/Abluftanlage mit Wärmerückgewinnung (Wärmerückgewinnungsgrad 80 %) (vgl. Kapitel 3.3.1)

- Automatisierte Verschattung:

Zwei Varianten: ohne Verschattung (Abminderungsfaktor  $F_c=1,0$ ) und mit Verschattung (Abminderungsfaktor  $F_c=0,1$ , aktiviert bei Einstrahlung  $> 200 \text{ W/m}^2$  und Außentemperatur  $> 16 \text{ °C}$ ) (vgl. Kapitel 3.3.4)

- Nutzungsprofil:

Zwei Varianten: Eines mit niedrigem und eines mit hohem Wärmeeintrag.

- Standort:

Vier Standorte: Köln, München, Potsdam (bei Berlin) und Hamburg. Diese Städte wurden gewählt, da sie zu den größten deutschen Städten gehören und eine gute geographische Verteilung darstellen [DES19]. Es werden Wetterdaten für das RCP 4.5-Szenario in 10-Jahresschritten von 2020 bis 2060 verwendet (sechs Zeitpunkte), basierend auf der Meteororm-Wetterdatenbank (vgl. Kapitel 5.1.1).

Zusätzliche Sensitivitäten werden für bestimmte Gebäudetypen berücksichtigt:

- Ausrichtung: Für das Einfamilienhaus, das Bildungsgebäude und die Gewerbehalle wird zusätzlich eine um  $90^\circ$  gedrehte Gebäudeorientierung untersucht (zwei Varianten): der Standardfall mit Nord-Süd-Ausrichtung sowie eine Variante mit Ost-West-Ausrichtung. Das Bürogebäude wird hier nicht betrachtet, da es quadratisch ist.
- Kompaktheit: Beim Bürogebäude wird das Verhältnis von Oberfläche zu Volumen durch die Varianten mit fünf bzw. einer Etage von  $0,412 \text{ m}^2/\text{m}^3$  auf  $1,03 \text{ m}^2/\text{m}^3$  verändert.
- Konstruktion: Das Einfamilienhaus wird mit zwei Bauweisen simuliert: leichte Holzständerkonstruktion und schwere Bauweise mit Kalksandstein.

Daraus ergeben sich die in Tabelle 5.1 angegebenen Sensitivitätskombinationen.

Zusätzlich wird für jedes Szenario die Wirkung verschiedener Dämmstärken untersucht. Die zusätzliche Dämmdicke wird dabei im Vergleich zum jeweiligen Standardszenario schrittweise von 0,0 m bis 0,5 m in 0,01 m-Schritten erhöht. Die

Tabelle 5.1.: Sensitivitäten nach Gebäudetyp

Variierte Größe	Einfamilienhaus	Büro	Bildung	Halle
Verglasung	2-fach/3-fach			
Fensterflächenanteil	Standard/verdoppelt			
Lüftung	mit/ohne Wärmerückgewinnung			
Verschattung	ohne ( $F_c = 1,0$ ) / mit ( $F_c = 0,1$ )			
Nutzungsprofil	2 Varianten			
Standorte	Köln/München/Potsdam/Hamburg			
Zusätzliche Sensitivitäten	Konstruktionsart & Ausrichtung	Kompaktheit	Ausrichtung	Ausrichtung
Kombinationen	512	256	256	256

zusätzliche Dämmung wird gleichmäßig auf alle opaken Hüllflächen angewendet. Die Dämmstärke stellt in dieser Arbeit jedoch keine eigenständige Sensitivitätsgröße dar, da sie eine Eingangsgröße der Optimierung ist und gemeinsam mit den anderen Parametern optimiert wird.

Zur Berechnung der verschiedenen thermischen Gebäudelastprofile wird die Norm DIN EN ISO 52016-1 verwendet [DIN18b] (vgl. Kapitel 2.3.2). Die Berechnung erfolgt mit einem in Python implementierten Modell, dass auf Grundlage der Testfälle der Norm sowie ergänzender Validierungsfällen verifiziert wurde [FEL20]. Im Vergleich zu aufwendigeren Simulationswerkzeugen wie TRNSYS oder EnergyPlus bietet dieses Verfahren eine gute Balance zwischen Modellgenauigkeit und Rechenaufwand und eignet sich daher insbesondere für die Betrachtung einer größeren Anzahl an Gebäudevarianten [BAL20a].

#### 5.1.2.1. Einfamilienhaus

Für das Einfamilienhaus wird ein Haus mit der Geometrie wie in Abbildung 5.2 dargestellt verwendet. Das Gebäude hat eine Nutzfläche von 172 m<sup>2</sup>. Es werden zwei verschiedene Ausrichtungen untersucht. Im Standardfall sind die Längsseiten des Gebäudes nach Osten/Westen und die Giebelseiten nach Norden/Süden orientiert; die Dachflächen sind entsprechend nach Osten und Westen geneigt. Zusätzlich wird eine um 90° gedrehte Variante betrachtet, bei der die Längsseiten nach Norden/Süden und die Giebelseiten nach Osten/Westen zeigt, sodass die Dachflächen nach Norden und Süden geneigt sind. Es wird von einer Luftwech-

selzahl ( $n$ ) von 0,45/h ausgegangen, welches 90 % der Luftwechselrate der DIN V 18599 für Wohngebäudenutzung beträgt [DIN18c], da von 10 % ungenutzter Fläche für Lagerräume, etc. ausgegangen wird [VER21]. Für die Konstruktion des Gebäudes wird ein thermisch leichtes Gebäude bestehend aus einer Holzständerkonstruktion und ein schweres Gebäude bestehend aus Kalksandstein und Beton betrachtet. Die Aufbauten für die verschiedenen Bauteile und Varianten sind in Tabelle 5.2 dargestellt. Dabei werden die Holzbalken und die Dämmung auf die Fläche verteilt angenommen. Die Stoffeigenschaften der Materialien sind in Tabelle 5.6 angegeben.

Tabelle 5.2.: Schichtaufbauten des Einfamilienhauses

Bauteil	Variante	Schichtaufbau
Wand	Leicht	2,4 cm Holz / 5 cm Mineralwolle / 1 cm Putz / 3,2 cm OSB-Platte
Wand	Schwer	24 cm Kalksandstein / 5 cm Mineralwolle / 2,5 cm Putz
Dach	Leicht	1 cm Ziegel / 2 cm Holz / 3,2 cm OSB-Platte / 1 cm Putz / 5 cm Mineralwolle
Dach	Schwer	10 cm Beton / 5 cm Mineralwolle
Boden	Beide	25 cm Beton / 5 cm Mineralwolle / 2 cm Bodenbelag

Das Gebäude wird auf 20 °C geheizt und auf 25 °C gekühlt, welches den Grenzwerten aus der DIN V 18599 entspricht [DIN18c]. Für die interne Last wird das dynamische Haushaltsprofil vom Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft (BDEW) verwendet [BDE17] und auf 40,5 kW h/(m<sup>2</sup> d) oder 81 kW h/(m<sup>2</sup> d) je nach Sensitivitätsfall skaliert. Dies entspricht 90 % der DIN V 18599-Last für entsprechende Nutzung [DIN18c] und dementsprechend auch von 10 % ungenutzter Fläche ausgeht [VER21].

### 5.1.2.2. Bürogebäude

Für das Bürogebäude werden zwei verschiedene Geometrien untersucht. Beide haben einen quadratischen Grundriss mit Kantenlängen von 15,5 m sowie eine Geschosshöhe von 2,6 m und sind beide schematisch in Abbildung 5.3 dargestellt. Die betrachteten Geometrien unterscheiden sich in der Etagenanzahl, die

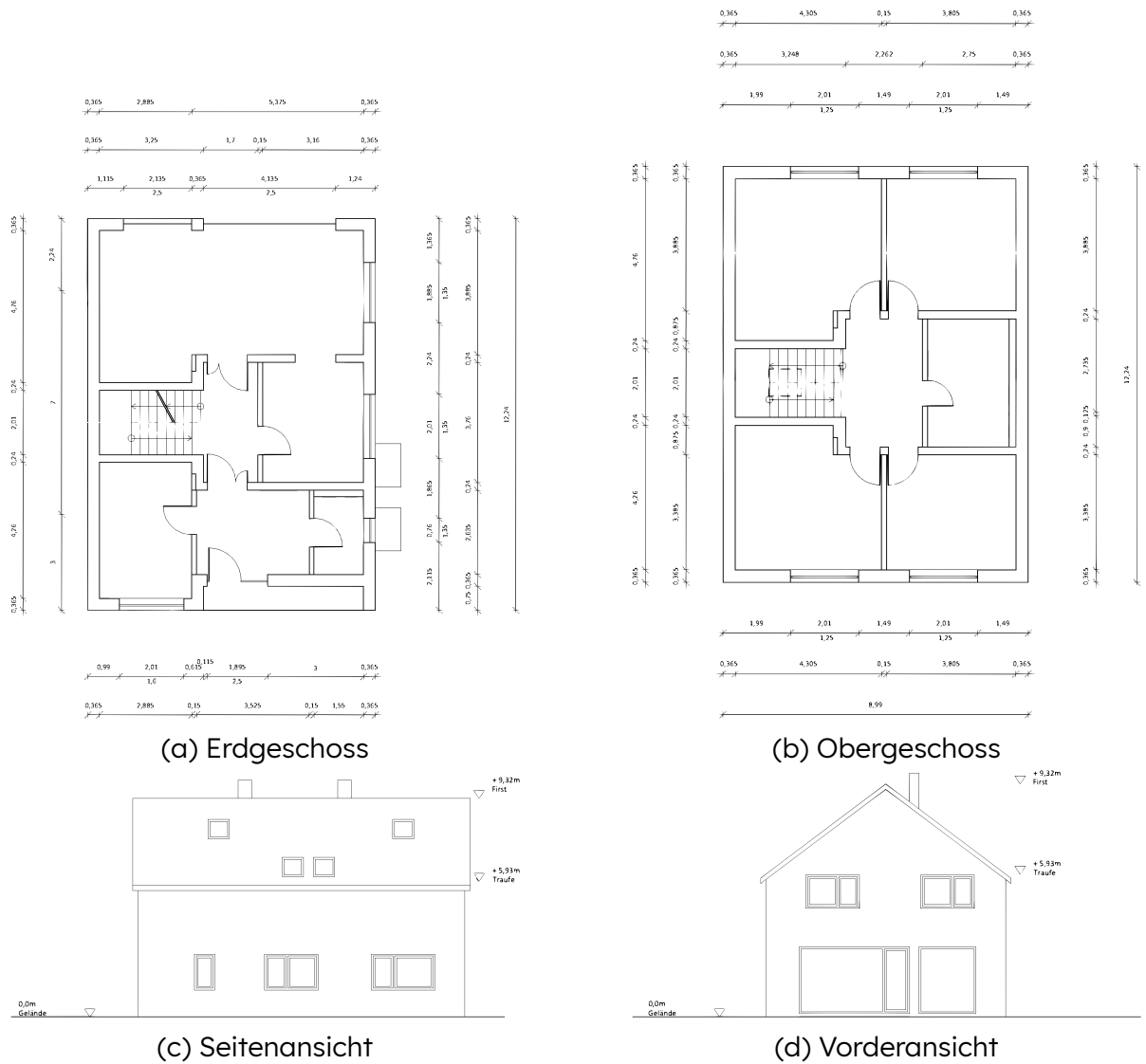


Abbildung 5.2.: Baupläne des repräsentativ untersuchten Einfamilienhauses

erste hat fünf und die zweite hat eine Etage. Damit ergeben sich Nutzflächen von  $1200 \text{ m}^2$  für die erste Geometrie und  $240 \text{ m}^2$  für die zweite. Auch das Oberflächen-zu-Volumen-Verhältnis ist dementsprechend anders. Für die erste Geometrie beträgt dieses  $0,412 \text{ m}^2/\text{m}^3$  und für die zweite  $1,03 \text{ m}^2/\text{m}^3$ . Der angesetzte Lüftungsvolumenstrom von  $3,2 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \text{ h})$  liegt bei 80 % des in der DIN V 18599 genannten Richtwertes für Bürogebäude [DIN18c]. Dies berücksichtigt, dass in typischen Bürogebäuden rund 80 % der Bruttogrundfläche als tatsächliche Nutz-

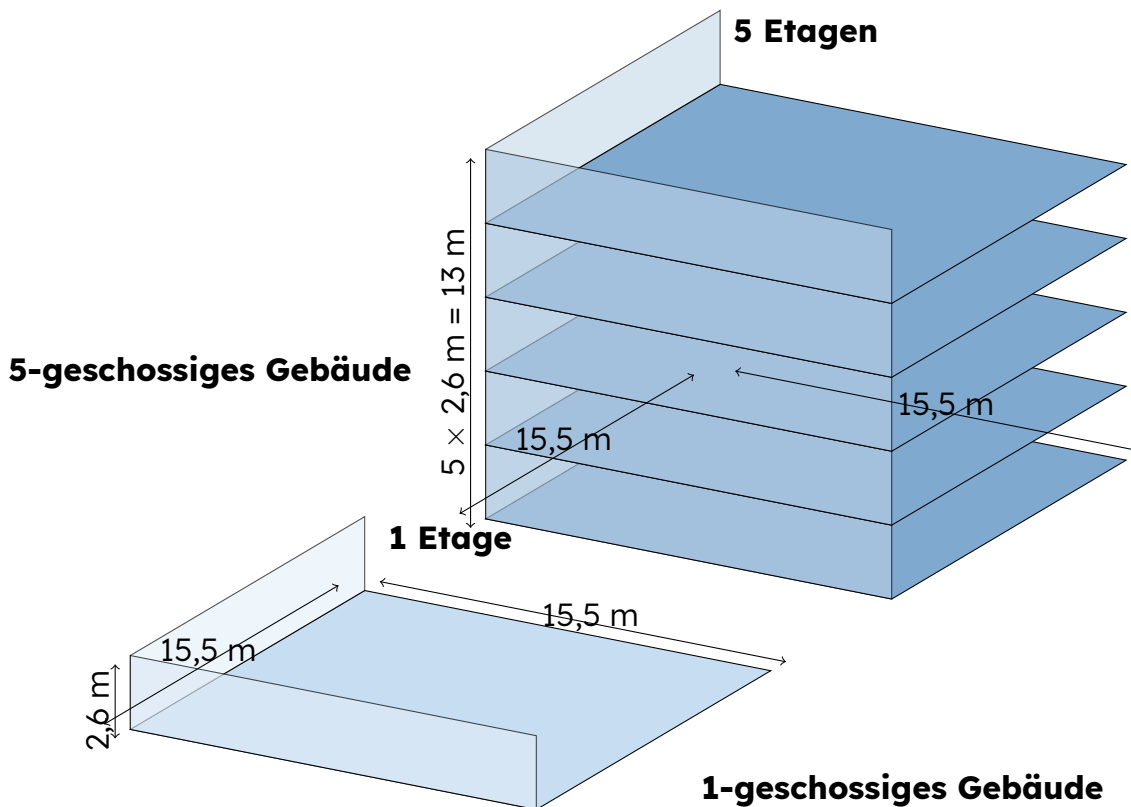


Abbildung 5.3.: Schematische 3D-Darstellung der untersuchten Bürogebäude-Geometrien

fläche genutzt und aktiv belüftet wird. Verkehrs- und Technikflächen sind in der Regel nicht direkt konditioniert. [VER21] Für die internen Lasten werden zwei verschiedene Profile betrachtet. Es werden zwei BDEW-Lastprofile betrachtet: Profil G0 mit einem Verbrauch von  $32 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \text{ d})$  und Profil G1 mit einem Verbrauch von  $106 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \text{ d})$  [BDE17]. Beide Profile werden für 250 Arbeitstage pro Jahr angewendet und entsprechen gemäß DIN V 18599 [DIN18c] 80 % eines hohen bzw. niedrigen Verbrauchs [BDE17], da von 20 % ungenutzter Fläche ausgegangen wird [VER21]. Die Fensterfläche pro Etage und Himmelsrichtung beträgt  $12 \text{ m}^2$ . In Tabelle 5.3 sind die Bauteilaufbauten dargestellt. Die Stoffeigenschaften der Materialien sind in Tabelle 5.6 angegeben. Das Gebäude wird auf  $21 \text{ }^\circ\text{C}$  geheizt und  $24 \text{ }^\circ\text{C}$  gekühlt, welches den Grenzwerten aus der DIN V 18599 entspricht [DIN18c].

Tabelle 5.3.: Schichtaufbauten des Bürogebäudes

Bauteil	Schichtaufbau
Wände	25 cm Beton / 5 cm Mineralwolle / 2,5 cm Putz [DIN11]
Dach	25 cm Beton / 5 cm Mineralwolle [DIN11]
Boden	25 cm Beton / 1 cm Mineralwolle / 2 cm Bodenbelag [DIN11]

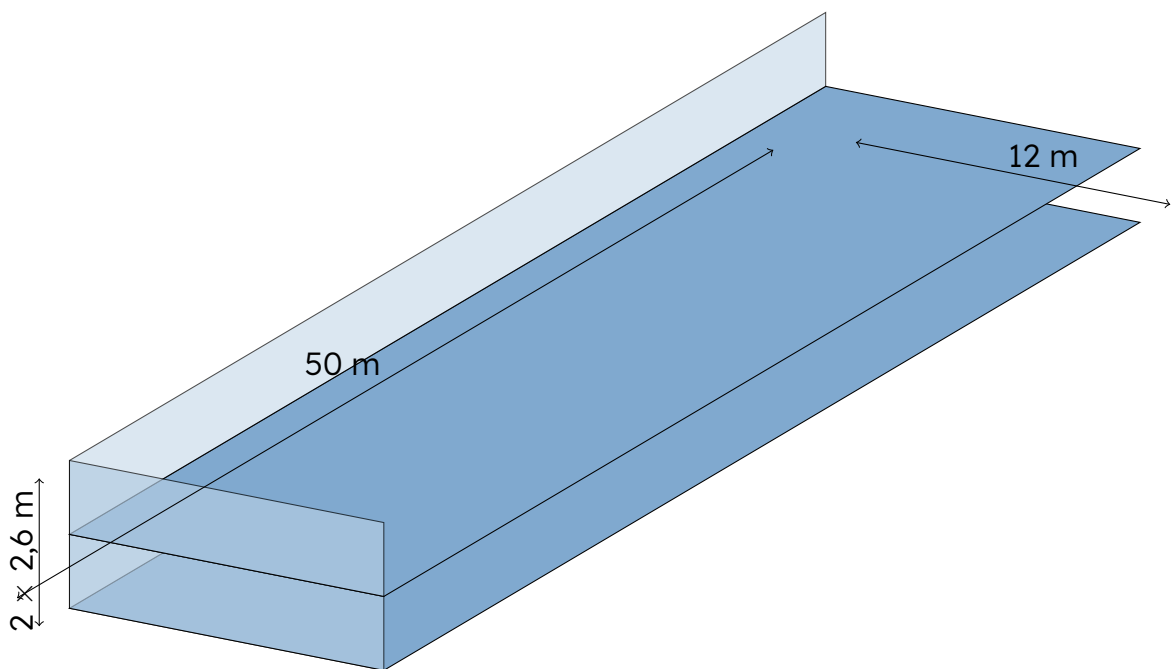


Abbildung 5.4.: Schematische 3D-Darstellung des Bildungsgebäudes

### 5.1.2.3. Bildungsgebäude

Für das Bildungsgebäude werden zwei verschiedene Ausrichtungen untersucht. Im Standardfall sind die Schmalseiten (12 m) nach Norden/Süden und die Längsseiten (50 m) nach Osten/Westen orientiert. Das Gebäude besitzt zwei Etagen mit jeweils 2,6 m Geschosshöhe und hat ein Flachdach. Damit ergibt sich eine Nutzfläche von 1200 m<sup>2</sup>, welche mit dem vom fünfstöckigen Bürogebäude vergleichbar ist. Zusätzlich wird eine um 90° gedrehte Variante betrachtet, bei der die Längsseiten nach Norden/Süden und die Schmalseiten nach Osten/Westen ausgerichtet ist. Das Gebäude ist in Abbildung 5.4 visualisiert. Es werden zwei verschiedene Nutzungen betrachtet. Zum einen die Nutzung als Schulgebäude und zum anderen die Nutzung als Hochschulgebäude. Damit er-

geben sich zwei verschiedene Lüftungsvolumenströme von  $8 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \text{ h})$  für die Schulnutzung und  $24 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \text{ h})$  für die Hochschulnutzung, welches 80 % der DIN V 18599 für entsprechende Nutzung beträgt [DIN18c]. Dies berücksichtigt, dass in typischen Bildungsgebäuden rund 80 % der Bruttogrundfläche als tatsächliche Nutzfläche genutzt und aktiv belüftet wird. Verkehrs- und Technikflächen sind in der Regel nicht direkt konditioniert. [VER21] Für beide Nutzungsarten wird das BDEW-Profil G1 herangezogen [BDE17]: für die Schulnutzung mit einem Verbrauch von  $96 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \text{ d})$  und für die Hochschulnutzung mit einem Verbrauch von  $355 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \text{ d})$ . Die Profile werden für 200 Arbeitstage pro Jahr angewendet und entsprechen gemäß der DIN V 18599 [DIN18c] 80 % des jeweiligen Verbrauchs, da von 20 % ungenutzter Fläche ausgegangen wird [VER21]. Die Fensterflächen betragen in Richtung Süden und Norden jeweils  $23,2 \text{ m}^2$  sowie in Richtung Westen und Osten jeweils  $96,8 \text{ m}^2$ . In Tabelle 5.4 sind die Bauteilaufbauten des Bildungsgebäudes dargestellt. Die Stoffeigenschaften der Materialien sind in Tabelle 5.6 angegeben. Das Gebäude wird auf  $21 \text{ °C}$  geheizt und  $24 \text{ °C}$  gekühlt, welches den Grenzwerten aus der DIN V 18599 entspricht [DIN18c].

Tabelle 5.4.: Schichtaufbauten des Bildungsgebäude

Bauteil	Schichtaufbau
Wände	25 cm Beton / 5 cm Mineralwolle / 2,5 cm Putz [DIN11]
Dach	25 cm Beton / 5 cm Mineralwolle [DIN11]
Boden	25 cm Beton / 1 cm Mineralwolle / 2 cm Bodenbelag [DIN11]

#### 5.1.2.4. Gewerbehalle

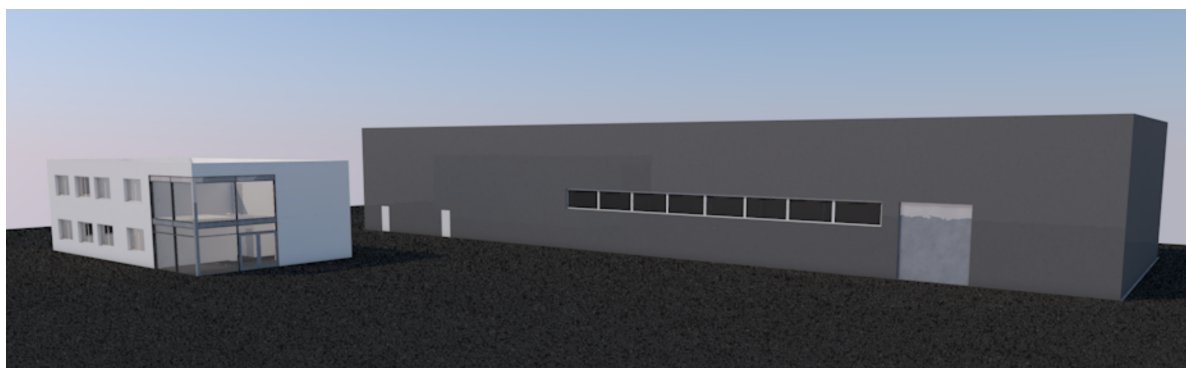


Abbildung 5.5.: 3D-Darstellung der Gewerbehalle (rechts) [REG19]

Die Gewerbehalle basiert auf Reger et al. [REG19] und hat eine Länge von 60 m, eine Breite von 20 m sowie eine Höhe von 9 m (siehe Abbildung 5.5). Für die Ausrichtung werden zwei Varianten untersucht. Im Standardfall sind die Schmalseiten (20 m) nach Norden/Süden und die Längsseiten (60 m) nach Osten/Westen orientiert. Damit ergibt sich eine Nutzfläche von 1200 m<sup>2</sup>, welche mit dem vom fünfstöckigen Bürogebäude vergleichbar ist. In der zweiten Variante sind die Längsseiten nach Norden/Süden und die Schmalseiten nach Osten/Westen ausgerichtet. Es werden zwei verschiedene Nutzungen betrachtet, zum einen die Nutzung mit „leichter Arbeit“ und zum anderen die Nutzung mit „schwerer Arbeit“ definiert nach der DIN V 18599 [DIN18c]. Damit ergeben sich zwei verschiedene Lüftungsvolumenströme von 2,8 m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup> h) für die „schwere Arbeit“ und 1,2 m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup> h) für die „leichte Arbeit“, welches 90 % der DIN V 18599 für entsprechende Nutzung beträgt [DIN18c]. Dies berücksichtigt, dass in typischen Gewerbehallen rund 90 % der Bruttogrundfläche als tatsächliche Nutzfläche genutzt und aktiv belüftet wird. Verkehrs- und Technikflächen sind in der Regel nicht direkt konditioniert. [VER21] Für beide Nutzungen wird das BDEW-Profil G1 [BDE17] mit einem Verbrauch von 339 kW h/(m<sup>2</sup> d) für die schwere Arbeit und 179 kW h/(m<sup>2</sup> d) für die leichte Arbeit bei 230 Arbeitstagen im Jahr angenommen, welches 90 % des Verbrauches nach DIN V 18599 entspricht [BDE17; DIN18c], da von 10 % ungenutzter Fläche ausgegangen wird [VER21]. Die Fensterflächen betragen Richtung Süden 60 m<sup>2</sup>, Richtung Norden 72 m<sup>2</sup> und auf dem Dach 96 m<sup>2</sup>. In Tabelle 5.5 sind die Bauteilaufbauten dargestellt. Die Stoffeigenschaften der Materialien sind in Tabelle 5.6 angegeben. Das Gebäude wird bei „leichter Arbeit“ auf 21 °C geheizt und im Bedarfsfall auf 24 °C gekühlt. Bei „schwerer Arbeit“ gelten entsprechende Werte von 18 °C für das Heizen und 28 °C für das Kühlen. Diese Temperaturgrenzen entsprechen den Vorgaben der DIN V 18599 [DIN18c].

Tabelle 5.5.: Schichtaufbauten der Gewerbehalle

<b>Bauteil</b>	<b>Schichtaufbau</b>
Wände	0,5 mm Stahl / 5 cm PUR / 0,5 mm Stahl [HEI24; KIN24; PAN24]
Dach	0,5 mm Stahl / 5 cm PUR / 0,5 mm Stahl [HEI24; KIN24; PAN24]
Boden	30 cm Beton / 1 cm PUR / 2 cm Bodenbelag

Tabelle 5.6.: Materialeigenschaften

<b>Material</b>	<b>Wärme- kapazität</b> [J/kgK]	<b>Dichte</b> [kg/m <sup>3</sup> ]	<b>Wärme- leitfähigkeit</b> [W/mK]	<b>Quelle</b> [-]
Beton	880	2300	1,7	[ALB14]
Mineralwolle	840	100	0,04	[KLE18; ALB14]
PUR	1400	50	0,025	[KLE18; ALB14]
Putz	790	1800	0,8	[ALB14]
Bodenbelag	1300	1000	1,7	[ALB14]
Stahl	750	7500	40	[ALB14]
Kalksandstein	1000	2000	1.1	[ALB14]
Holz	1600	500	0.13	[ALB14]
OSB-Platte	1700	650	0.13	[ALB14]
Ziegel	800	200	1	[ALB14]

### 5.1.3. Quartierslastprofile

Im Rahmen der folgenden beiden Kapitel werden zwei Quartiere vorgestellt, anhand derer ebenfalls die Auswirkungen einer DLZA untersucht werden. Dabei handelt es sich zum einen um eine Einfamilienhaussiedlung und zum anderen um einen Gewerbepark. Beide sollen neben einer Individualversorgung mit Wärme sowie Kälte auch mit einem 5GDHC-System versorgt werden (vgl. Kapitel 3.5), für welches Gleichzeitigkeit eine Rolle spielt (vgl. Kapitel 2.4).

#### 5.1.3.1. Einfamilienhaussiedlung

Abbildung 5.6 zeigt den Plan der Einfamilienhaussiedlung, die aus 46 Gebäuden besteht. Die Lastprofile der einzelnen Gebäude entsprechen den in Kapitel 5.1.2.1 beschriebenen Profilen. Die untersuchte Siedlung basiert auf einem Modell, das am Solar-Institut Jülich bereits in früheren Studien detailliert analysiert wurde. Die Auswahl erfolgte, um auf den vorhandenen Datengrundlagen aufzubauen und so eine konsistente Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten.

Zur Hochskalierung wird das Lastprofil zeitlich geglättet, indem die Einzelwerte unter Einhaltung eines Gleichzeitigkeitsfaktors von 0,85 [WIN01] normalverteilt auf benachbarte Zeitpunkte verteilt werden. Das angewandte Modell wurde bereits in Blanke et. al. [BLA24b] veröffentlicht (vgl. Kapitel 2.4).



Abbildung 5.6.: Lageplan der Einfamilienhaussiedlung

### 5.1.3.2. Gewerbepark

Der Gewerbepark besteht aus 37 Gebäuden, welche in Abbildung 5.7 skizziert sind. Er setzt sich zusammen aus einem Schulgebäude (gelb), einem Universitätsgebäude (orange), Bürogebäuden (rot), Hallenbauten mit einer Gewerbenutzung (blau) sowie Hallenbauten mit einer kombinierten Gewerbe- und Büronutzung (grün). Die Flächen der verschiedenen Gebäude sind in Tabelle 5.7 nach Geschoss- und Nutzfläche aufgeschlüsselt, bei den gemischt genutzten Hallen sind die Flächen zusätzlich nach Gewerbe- und Büronutzung getrennt. Für die Lastprofile werden die Profile der jeweiligen Einzelgebäude aus den Kapiteln 5.1.2.2, 5.1.2.3 und 5.1.2.4 verwendet. Die Einzelgebäude wurden für zwei verschiedene Lastprofile berechnet, die den Nutzungstypen des Quartiers entsprechen. So wird das Bildungsgebäude sowohl mit Hochschul- als auch mit Schulnutzung betrachtet; das Bürogebäude wird einmal mit intensiver Büronutzung (reine Büronutzung) und einmal mit reduzierter Büronutzung (Kombination mit Hallengebäude) modelliert. Außerdem wird ein Hallengebäude mit alleiniger Gewerbe-

nutzung als schwach beheizt und das andere als stark beheizt mit entsprechend angepassten Nutzungsprofilen angenommen. Der zugrunde liegende Gewerbepark basiert auf einem Modell, das am Solar-Institut Jülich bereits in früheren Untersuchungen detailliert analysiert wurde. Die Auswahl erfolgte, um auf bestehenden Datengrundlagen aufzubauen und so eine konsistente Vergleichbarkeit der Ergebnisse sicherzustellen.

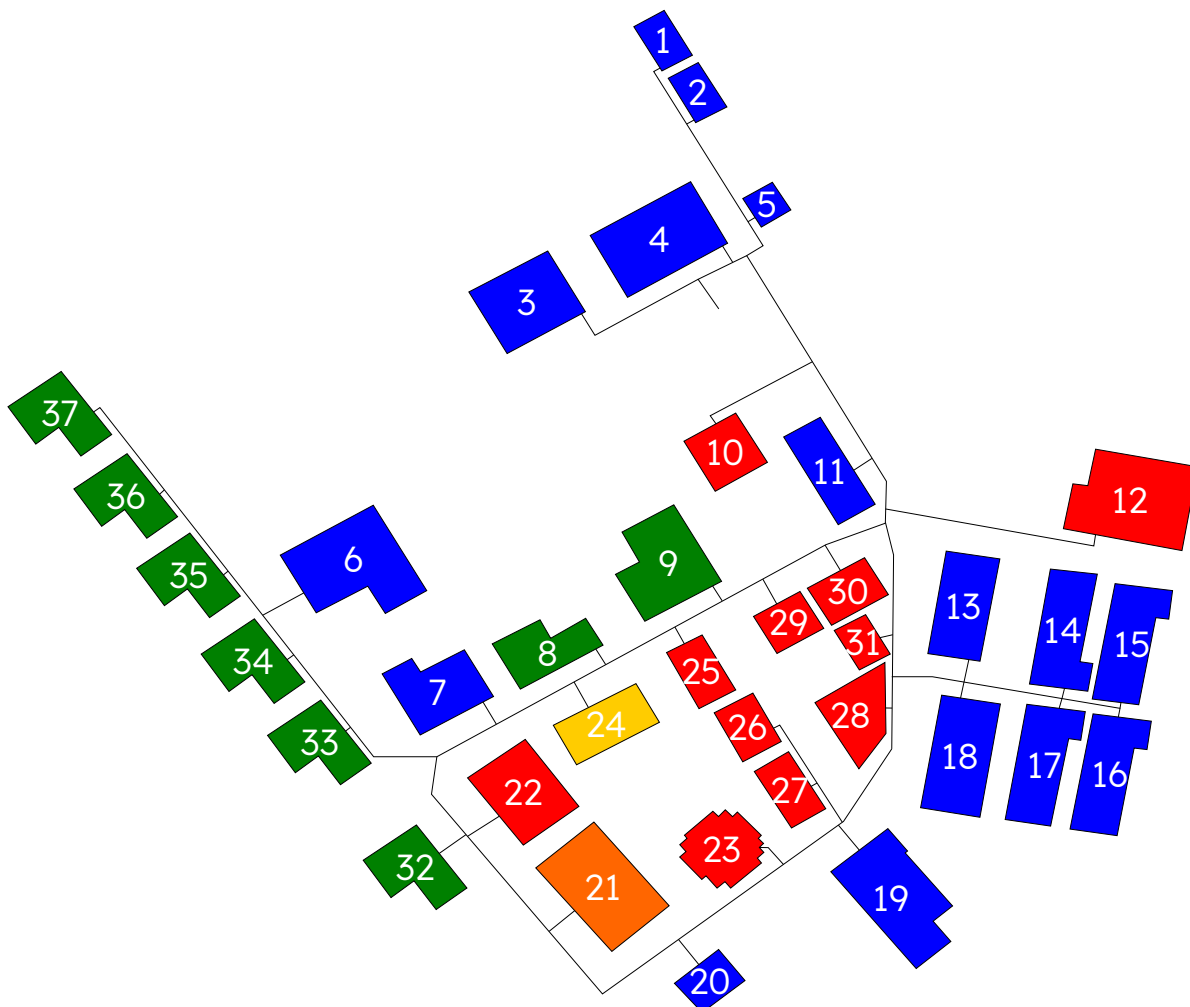


Abbildung 5.7.: Lageplan des Gewerbepark (Schulgebäude (gelb), Universitätsgebäude (orange), Bürogebäude (rot), Hallenbauten mit einer Gewerbenutzung (blau), Hallenbauten mit einer Gewerbenutzung und Büronutzung (grün))

Tabelle 5.7.: Flächen des Gewerbeparcs

Gebäudetyp	Grundfläche	Nutzfläche
Gewerbe beheizt	35939	35939
Gewerbe inkl. Büro	16789	16789
Büro	69964	194972
Büro inkl. Gewerbe	38074	76148
Schule	8205	24615
Universität	16350	49050

#### 5.1.4. Erzeugungsprofil Photovoltaik

Zur Berechnung des Ertrags der PV-Module pro Quadratmeter wird die Bibliothek `pvlib` verwendet, dies ist eine Python-Bibliothek für die Berechnung von PV-Modulen inklusive einer entsprechenden Datenbank [HOL18]. Der Ertrag wird für alle vier Standorte und fünf Dachausrichtungen der betrachteten Gebäude berechnet. Bei Flachdächern sind die PV-Module mit einer Neigung von  $5^\circ$  nach Süden ausgerichtet. Bei Wohngebäuden mit geneigtem Dach beträgt die Neigung  $30^\circ$  und richtet sich nach der jeweiligen Himmelsrichtung der Dachflächen.

Für die Berechnung des PV-Ertrags wurde über alle in der `pvlib`-Datenbank enthaltenen Modultypen der Firma Solar Fabrik gemittelt. Die Auswahl fiel auf Solar Fabrik, da deren Module sowohl in verschiedenen Leistungsklassen als auch mit unterschiedlichen technischen Spezifikationen in der `pvlib`-Datenbank vertreten sind. Dies ermöglicht eine realitätsnahe Abbildung marktüblicher PV-Module ohne Beschränkung auf einen einzelnen Typ oder Hersteller mit Sondermerkmalen. [FAB23; HOL18; BUR23; FON23]

#### 5.1.5. Emissionen für den Stromsektor

Für die Betrachtung der LZA-Phase „Energieverbrauch im Betrieb“ (B6, siehe Kapitel 2.1.1) ist die Interaktion mit dem Stromsektor entscheidend. Es werden fünf Szenarien für die Betrachtung der LZA-basierten  $\text{CO}_{2\text{-eq}}$ -Emissionsfaktoren für die Interaktion mit dem Stromsektor betrachtet (vgl. Kapitel 4.1). Das Szenario 50-J-K betrachtet einen über das Jahr und die Lebensdauer konstanten Faktor von  $395 \text{ g}/(\text{kWh})$ . Damit der Einfluss von stündlich aufgelösten Zeitreihen untersucht werden kann, werden im Szenario 50-S-K stündlich aufgelösten Emissionswerte für das Jahr 2020 betrachtet, welche über die Lebensdauer der Gebäude

konstant bleiben. Das Szenario 50-J-D dient dazu, den Einfluss der Dekarbonisierung des Stromsektors zu berücksichtigen. Deshalb wird hier der durchschnittliche Emissionsfaktor über die Lebensdauer und als über die Stunden des Jahres konstanter Faktor von  $142 \text{ g}/(\text{kWh})$  betrachtet. Um zu überprüfen, welchen Einfluss stündlich aufgelöste Emissionswerte des Stromsektors im Dekarbonisierungsprozess haben, werden im Szenario 50-S-D die stündlich aufgelösten Daten über jede Stunde des Jahres gemittelt und somit für jede Stunde im Jahr über die Lebensdauer des Gebäudes gemittelte Werte betrachtet. Im Szenario 10-S-D werden die durchschnittlichen stündlichen Emissionswerte in einem 10-Jahres-Raster betrachtet. Dadurch kann die nachfolgende Betriebsoptimierung die Gesamtemissionen gezielter minimieren. Die zugrundeliegenden Zeitreihen können dem Szenario S45-RCP4.5 aus Blanke et al. [BLA26] entnommen werden.

## 5.2. Profilselektion und Aufbereitung für die Optimierung

Für die Untersuchung der verschiedenen Forschungshypothesen werden unterschiedliche Datengruppen benötigt. Eine Datengruppe besteht aus Lastprofil für die thermische Last und einen Lastprofil für die elektrische Last, einem Erzeugungsprofil für die PV-Anlage relativ zur Fläche, dem Verlauf der Umgebungstemperatur zur COP-Berechnung, Emissionsdaten für die Interaktion mit dem Stromsektor sowie Emissionsdaten für die Herstellung und Entsorgung der Dämmung und der Gebäudetechnik. Zuerst wird in diesem Kapitel auf die Zeitreihen für die Lasten, die Umgebungstemperatur, PV-Erzeugung und Stromsektoremissionen eingegangen. Im Anschluss werden die Emissionen für die Herstellung und Entsorgung der Dämmung und Gebäudetechnik vorgestellt. Diese Datengruppen werden getrennt für ein Ausgangsszenario und ein Alternativszenario zur Untersuchung einer Forschungshypothese oder einer vereinfachten Annahme erstellt. Für die Haupthypothesen H3 bis H6 werden Alternativszenarien aufgestellt und für die Untersuchung der Haupthypothesen H1 und H2 werden als Szenarien eine Ganzjahreszeitreihe und eine Zeitreihe bestehend aus typischen Perioden verwendet. Dies dient dazu den Einfluss der Verwendung von typischen Perioden aufzuzeigen, da lediglich typische Perioden für die Haupthypothesen

H3 bis H6 und die Quartiersoptimierung Anwendung finden.

### **5.2.1. Zeitreihen**

In diesem Unterkapitel wird auf die Zeitreihen für die Datengruppen eingegangen. Zuerst werden Ganzjahreszeitreihen erläutert und anschließend erklärt wie die typischen Perioden erstellt werden.

#### **5.2.1.1. Ganzjahreszeitreihe**

Für die Betrachtung einer Ganzjahreszeitreihe werden die Originaldaten für die Außentemperatur, die PV-Leistungsprofile, die Emissionen des Stromsektors sowie die Heiz-, Kühl- und Elektrizitätslasten zu einer Ganzjahreszeitreihe kombiniert.

#### **5.2.1.2. Typische Perioden**

Außerdem werden typische Perioden aus den Zeitreihen gebildet, die aus der Außentemperatur, den PV-Leistungsprofilen, den Emissionsdaten für den Stromsektor und dem Heiz-/Kühl-/Strombedarf bestehen. Es werden 40 typische Perioden mit jeweils 24 Stunden für jede Periode erstellt, da diese Anzahl zu guten Ergebnissen führt, da sie einen geeigneten Kompromiss zwischen Abbildungsgenauigkeit und Rechenaufwand darstellt [KOT18a; HOF21]. Zur Erzeugung der typischen Perioden wird die Bibliothek TSAM verwendet [IER24; HOF20]. Für das Clustern der typischen Perioden wird die hierarchische Clusterung gewählt, da sie sich in der Literatur für Zeitreihen dieser Art als besonders geeignet erwiesen hat [KOT18a] (vgl. Kapitel 2.6). Um auch Extrema in den Zeitreihen abzubilden, werden diese als zusätzliche Clusterzentren berücksichtigt [KOT18a]. Dabei gehen die jährlichen Maximalwerte des Heiz- und Kühlbedarfs, der Außenlufttemperatur sowie der Emissionswerte in die Clusterung ein. Für die Außenlufttemperatur und die Emissionswerte werden zusätzlich auch die jeweiligen Minimalwerte in die typischen Perioden aufgenommen.

### **5.2.2. Emissionsdaten**

Für die spätere Optimierung werden Emissionsdaten für die Gebäudetechnik und die Dämmung benötigt. Wie diese Emissionsdaten bestimmt werden, wird nach-

folgend vorgestellt. Hierbei werden die Phasen A1-A3, C1-C3 sowie D (vgl. Kapitel 2.1.1) aus der LZA-Datenbank ÖKOBAUDAT [BBS23] betrachtet (vgl. Kapitel 2.1.3). Dabei werden die oben genannten Phasen aufsummiert und die Summe zur Optimierung genutzt. Bei der Untersuchung der Haupthypothese H6 wird die Phase D nicht betrachtet.

### 5.2.2.1. Gebäudetechnik

Für die Optimierung der Größe der gebäudetechnischen Komponenten werden Emissionsdaten in Form linearer Gleichungen benötigt, die durch ihre Steigung ( $k$ ) und ihren Achsenabschnitt ( $b$ ) beschrieben werden. Liegen mehrere Datensätze vor, werden Steigung und Achsenabschnitt mittels einer linearen Regression nach der Methode der kleinsten Quadrate bestimmt [KOT23]. Alle Emissionsdaten dieses Abschnitts stammen aus der ÖKOBAUDAT-Datenbank und sind in den Tabellen A.1 bis A.4 jeweils mit und ohne Phase D ausgewiesen (vgl. Kapitel 2.1.3).

Für die Emissionswerte der PV und der Batterie können die angegebenen Datensätze direkt verwendet werden, da diese bereits spezifisch zur Komponentengröße sind. Die Daten für den Heizstab basieren auf dem Datensatz für einen Durchlauferhitzer und werden durch dessen Größe von 21 kW geteilt, um die spezifischen Emissionen zu erhalten.

Die Emissionswerte für die Sole-Wasser-Wärmepumpe basieren auf drei Datensätzen mit einem Erdkollektor als Wärmequelle anstelle von Erdsonden, da die Datensätze mit Erdsonden trotz geringeren Materialbedarfs um Faktoren von zwei bis sieben höher liegen als die vergleichbaren Datensätze von Luft-Wasser-Wärmepumpen. Für die Sole-Wasser-Wärmepumpe liegen Datensätze für Leistungen von 10, 20 und 70 kW vor. Daraus werden, wie in der Einleitung zu diesem Abschnitt beschrieben, Steigung und Achsenabschnitt mittels linearer Regression bestimmt. Auch für die Luft-Wasser-Wärmepumpe sind drei Datensätze (7, 10 und 14 kW) verfügbar, die in gleicher Weise linearisiert werden.

Für die Erdsonden (geothermische Anlage) sind ebenfalls drei Datensätze für drei Leistungen (10, 20, 70 kW) in der Datenbank hinterlegt. Da hier allerdings keine Leistung, sondern eine Länge benötigt wird, wird die Leistung durch 45 W/m geteilt. Die Entzugsleistung von 45 W/m ist nach dem Bundesverband Geothermie

[GEO24] und VDI 4640 [VDI19] üblich für Erdreiche mit einer Wärmeleitfähigkeit von  $2 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$  bis  $2,5 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ . Dieser Wertebereich ist in NRW vorherrschend [NOR24] und wird deswegen verwendet.

Für die thermischen Speicher sind zwei Datensätze für Pufferspeicher, einer aus Stahl und einer aus Edelstahl, in der Datenbank enthalten. Diese sind allerdings spezifisch auf das Gewicht eines leeren Speichers und nicht spezifisch auf die speicherbare Energiemenge angegeben. Deswegen werden sie zunächst mit der im Datensatz angegebenen Tabelle auf ein Speichervolumen umgerechnet. Im Anschluss werden die Volumina mit einer angenommenen Wärmekapazität für das Speichermedium Wasser von  $4183 \text{ J}/(\text{kg K})$  [DUB97] und einer Temperaturdifferenz von  $10 \text{ K}$  auf die benötigte spezifische Energiemenge umgerechnet. Die Ergebnisse werden linearisiert und ergeben damit die angegebenen Steigungen und Achsenabschnitte.

#### **5.2.2.2. Dämmung**

Die betrachteten Gebäude werden mit unterschiedlichen Dämmstärken modelliert (vgl. Kapitel 5.1.2). Die zugehörigen Emissionen für verschiedene Dämmstoffe mit und ohne Phase D sind in den Tabellen A.5 und A.6 dargestellt. Dort sind die im Markt vorherrschenden Dämmstoffe (vgl. Kapitel 3.4.1) mit den zugehörigen Datensätzen aus der ÖKOBAUDAT-Datenbank [BBS23] aufgeführt. Neben den einzelnen Dämmstoffen sind auch nach Volumenanteilen gewichtete Marktmittelwerte angegeben (vgl. Kapitel 3.4.1).

Da Hallenbauten häufig mit Sandwichelementen auf PUR-Basis errichtet werden (vgl. Kapitel 3.4.1), wird für die untersuchte Gewerbehalle PUR als Dämmstoff angesetzt. Für alle übrigen Gebäude wird die nach Volumenanteilen gewichteten Marktmittelwerte verwendet.

Zusätzlich wird die über die Lebensdauer eintretende Degradation der Dämmwirkung berücksichtigt (vgl. Kapitel 3.4.2). Dies erfolgt in der energetischen Bewertung durch eine Reduktion der effektiven Dämmdicke über die Zeit (vgl. Kapitel 4.2.3).

## 5.3. Emissionsminimierung

Um die Dämmung und Gebäudetechnik zu dimensionieren sowie den Betrieb mit möglichst geringen Emissionen umzusetzen, werden die Emissionen mittels der Methode eines MILP minimiert (Siehe Kapitel 2.6). Deshalb werden in diesem Kapitel verschiedene Modelle zur Abbildung von gebäudetechnischen Komponenten und das Optimierungsziel vorgestellt. Außerdem werden die verschiedenen Gebäudetechnikvarianten und der verwendete Optimierer sowie dessen genaue Einstellungen erläutert.

### 5.3.1. Optimierungsziel

Das Ziel der Optimierung ist es, die Emissionen für die Betriebsphase ( $Em_{\text{Betrieb}}$ ) und die Konstruktion der Dämmung sowie der Gebäudetechnik ( $Em_{\text{Konstruktion}}$ ) zu minimieren.

$$\min (Em_{\text{Betrieb}} + Em_{\text{Konstruktion}}) \quad (5.1)$$

Die Emissionen der Betriebsphase bestehen ausschließlich aus denen der Interaktion mit dem Elektrizitätsnetz. Emissionen aus Reparaturen und Sanierungen werden hier vernachlässigt, da sie methodisch nur schwer quantifizierbar sind – insbesondere aufgrund fehlender Daten zu Art, Umfang und Häufigkeit solcher Eingriffe während der Lebensdauer [WAN24]. Der Austausch baulicher Komponenten im Lebenslauf wird dagegen über die konstruktionsbedingten Emissionen abgebildet. Die Betriebsemissionen werden mit den Gleichungen der verschiedenen Modellierungsansätze aus Kapitel 4.1 berechnet. Dazu wird die eingekaufte und verkaufte Menge an elektrischer Energie von Leistung in Energie anhand der beiden folgenden Formeln mittels der Zeitschrittweite ( $\delta t$ ) und der Anzahl der typischen Periode zum Zeitschritt  $\dagger$  pro Jahr ( $w$ ) berechnet:

$$E_{\text{einkauf}}(t) = P_{\text{einkauf}}(t) \cdot w(t) \cdot \delta t \quad \forall t \in T \quad (5.2)$$

$$E_{\text{verkauf}}(t) = P_{\text{verkauf}}(t) \cdot w(t) \cdot \delta t \quad \forall t \in T \quad (5.3)$$

Die konstruktionsbedingten Emissionen setzen sich aus den Emissionen der Ge-

bäudetechnikkomponenten ( $Em_i$ ) und den, mit ihrer binären Auswahlvariable ( $b_d$ ) multiplizierten, Emissionen der verschiedenen Dämmstärken ( $Em_{\text{Dämmung}(i)}$ ) zusammen. Die Emissionen der Gebäudetechnikkomponenten werden zusätzlich mit dem Faktor  $J/l_i$  multipliziert, wobei  $J$  die Jahre des Betrachtungszeitraums und  $l_i$  die Lebensdauer der jeweiligen Komponente darstellt. Dadurch wird berücksichtigt, dass Komponenten innerhalb des Betrachtungszeitraums mehrfach ersetzt werden müssen. Als Lebensdauer werden 20 Jahre für alle Gebäudetechnikkomponenten angenommen. Lediglich die Geothermie-Anlage wird mit einer Lebensdauer von 50 Jahren betrachtet.

$$Em_{\text{Konstruktion}} = \sum_i^{\text{Komponenten}} \frac{J \cdot Em_i}{l_i} + \sum_i^{\text{Dämmung}} Em_{\text{Dämmung}(i)} \cdot b_d(i) \quad (5.4)$$

Die Auswahlvariablen sind entweder eins oder null, wobei stets nur eine Variable den Wert eins annehmen kann, um die ausgewählte Dämmstärke zu kennzeichnen.

$$\sum_i b_d(i) = 1 \quad (5.5)$$

Alle nachfolgenden Zeitindex-basierten Gleichungen gelten für  $\forall t \in T$ .

### 5.3.2. Gebäudetechnikvarianten

Für die bessere Untersuchung der verschiedenen Forschungshypothesen werden verschiedene Varianten für die Gebäudetechnik untersucht. Diese sind in Abbildung 5.8 dargestellt. Zum Einen wird zwischen dem reinen Heizfall und dem kombinierten Heiz- und Kühlfall unterschieden. Im reinen Heizfall muss neben der elektrischen Last lediglich der Heizbedarf gedeckt werden. Beim kombinierten Fall muss sowohl der Heizbedarf als auch der Kühlbedarf gedeckt werden. Im Heizfall wird zwischen vier Varianten unterschieden. Die Basis bildet die Deckung des Heizbedarfs mit einem elektrischen Heizstab (*Heizstab*). In Variante zwei (*L-W-WP*) wird das System um eine Luft-Wasser-Wärmepumpe erweitert, in Variante drei (*L-W-WP+PV*) zusätzlich um Photovoltaik und in Variante vier (*L-W-WP+PV+Sp.*) wiederum um einen Batteriespeicher sowie einen Heizungspuf-

ferspeicher. Für den kombinierten Heiz- und Kühlfall wird auch zwischen vier Varianten unterschieden. Die erste Variante (L-W-WP) verwendet eine reversible Luft-Wasser-Wärmepumpe zur Deckung des Heiz- und Kühlbedarfs. Lediglich der Heizbedarf kann alternativ mit einem Heizstab gedeckt werden. Die zweite Variante (L-W-WP+PV) ergänzt das vorherige System um eine PV-Anlage. Die dritte Variante (L-W-WP+PV+Sp.) ergänzt die vorherige um einen elektrischen Speicher sowie je einem Pufferspeicher für warmes bzw. kaltes Heizungswasser. In der letzten Variante (S-W-WP+PV+Sp.) wird die Luft-Wasser-Wärmepumpe durch eine Sole-Wasser-Wärmepumpe mit einem Erdsondenfeld ersetzt. Das Erdsondenfeld kann zur freien Kühlung verwendet werden (vgl. Kapitel 3.1.3).

Für die Quartiersoptimierung wird das Geothermiesystem durch ein 5GDHC-System ersetzt (vgl. Kapitel 3.5), welches dann durch ein zentrales Erdsondenfeld gespeist wird (vgl. Kapitel 3.2.1).

Die Größen aller gebäudetechnischen Komponenten werden im Optimierungsmodell als kontinuierliche Entscheidungsvariablen behandelt und sind nicht vorab festgelegt. Dadurch kann das Modell auch Lösungen ermitteln, in denen bestimmte Komponenten – beispielsweise ein Speicher – trotz prinzipieller Verfügbarkeit nicht ausgewählt werden.

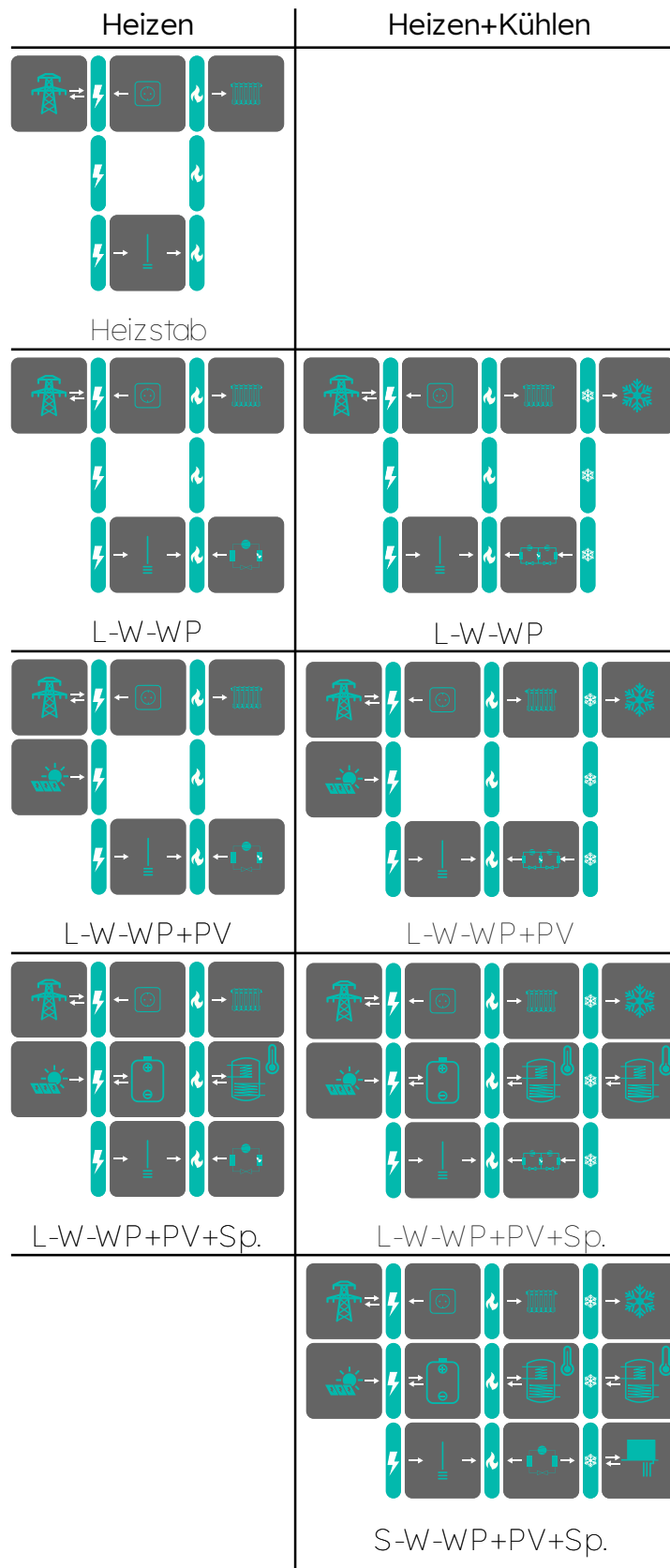


Abbildung 5.8.: Darstellung der verschiedenen Gebäudetechnikvarianten für den Heizfall und den kombinierten Heiz- und Kühlfall

### 5.3.3. Bedarfsabbildung

Es werden der elektrische Elektrizitätsbedarf, der Heizbedarf und der Kältebedarf berücksichtigt. Der Heizbedarf und der Kühlbedarf sind abhängig von der Dämmstärke. Deswegen werden die 51 auswählbaren Dämmstärken mittels binären Variablen ( $b_d$ ) mit ihrem jeweiligen Lastprofil ( $\dot{Q}_{H,i}$ ) multipliziert. Die Summe der verschiedenen Lastprofile ergibt dann das Heizlastprofil ( $\dot{Q}_H$ ).

$$\dot{Q}_H(t) = \sum_{i=1}^{51} \left( \dot{Q}_{H,i}(t) \cdot b_d(i) \right) \quad (5.6)$$

Der Kühlbedarf wird auf die selbe Art und Weise abgebildet.

$$\dot{Q}_K(t) = \sum_{i=1}^{51} \left( \dot{Q}_{K,i}(t) \cdot b_d(i) \right) \quad (5.7)$$

Der Bedarf an elektrischer Energie ( $P_{el.B.}$ ) kann über vom Elektrizitätsnetz bezogene elektrische Energie ( $P_{einkauf}$ ), erzeugte Menge an elektrischer Energie aus PV ( $P_{pv}$ ) oder elektrische Energie aus dem elektrischen Speicher ( $P_{Batt,E}$ ) gedeckt werden. Neben dem Bedarf an elektrischer Energie muss in der Bilanz auch die ins Elektrizitätsnetz eingespeiste Energie ( $P_{verkauf}$ ) berücksichtigt werden. Darüber hinaus sind folgende elektrische Energiemengen zu erfassen: die für den Heizstab ( $P_{HS}$ ), für die heizende ( $P_{L-W-WP,H}$ ) und kühlende Luft-Wasser-Wärmepumpe ( $P_{L-W-WP,K}$ ), für die Sole-Wasser-Wärmepumpe ( $P_{S-W-WP}$ ) sowie für das Laden des elektrischen Speichers ( $P_{Batt,L}$ ).

$$P_{el.B.}(t) = P_{einkauf}(t) + P_{pv}(t) + P_{Batt,E}(t) - P_{verkauf}(t) - P_{HS}(t) - P_{L-W-WP,H}(t) - P_{L-W-WP,K}(t) - P_{S-W-WP}(t) - P_{Batt,L}(t) \quad (5.8)$$

Zur Deckung des Heizbedarfs ( $\dot{Q}_H$ ) stehen die Luft-Wasser-Wärmepumpe ( $\dot{Q}_{L-W-WP,H}$ ), die Sole-Wasser-Wärmepumpe ( $\dot{Q}_{S-W-WP,H}$ ), der Heizstab ( $\dot{Q}_{HS}$ ) oder der thermische Speicher zur Verfügung ( $\dot{Q}_{WS,E}$ ). Neben dem Heizbedarf muss auch die Wärmeenergie für das Laden des thermischen Speichers ( $\dot{Q}_{WS,L}$ ) zur Verfügung gestellt werden.

$$\dot{Q}_H(t) = \dot{Q}_{L-W-WP,H}(t) + \dot{Q}_{S-W-WP,H}(t) + \dot{Q}_{HS}(t) + \dot{Q}_{WS,E}(t) - \dot{Q}_{WS,L}(t) \quad (5.9)$$

Zur Deckung des Kühlbedarfs ( $\dot{Q}_K$ ) stehen die Luft-Wasser-Wärmepumpe ( $\dot{Q}_{L-W-WP,K}$ ), die Sole-Wasser-Wärmepumpe ( $\dot{Q}_{S-W-WP,K}$ ), die Geothermieanlage ( $\dot{Q}_{Geo,E}$ ) oder der thermische Speicher zur Verfügung ( $\dot{Q}_{KS,E}$ ). Neben dem Kühlbedarf muss auch die Kälte für das Laden des thermischen Speichers ( $\dot{Q}_{KS,L}$ ) sowie die dem Erdreich entzogene Wärmemenge ( $\dot{Q}_{Geo,L}$ ) zur Verfügung gestellt werden.

$$\dot{Q}_K(t) = \dot{Q}_{L-W-WP,K}(t) + \dot{Q}_{S-W-WP,K}(t) + \dot{Q}_{KS,E}(t) - \dot{Q}_{KS,L}(t) + \dot{Q}_{Geo,E}(t) - \dot{Q}_{Geo,L}(t) \quad (5.10)$$

### 5.3.4. Heizstab

Ein Heizstab setzt elektrische Energie direkt in Wärmeenergie um. Für die Modellierung wird eine Effizienz von 93 % angenommen. Dieser Wert entspricht dem oberen Bereich der in der Literatur berichteten Effizienzen (vgl. Kapitel 3.1.4) und basiert auf den Untersuchungen von Sezai et al. [SEZ05].

$$\dot{Q}_{HS}(t) = 0,93 \cdot P_{HS}(t) \quad (5.11)$$

Die elektrische Leistung des Heizstabs ist begrenzt zur maximalen Leistung des Heizstabs ( $P_{HS,max}$ ).

$$P_{HS}(t) \leq P_{HS,max} \quad (5.12)$$

Damit ergeben sich die herstellungsbedingten Emissionen für den Heizstab ( $Em_{HS}$ ) linear abhängig von der maximalen Leistung des Heizstabs. Der lineare Emissionsfaktor  $k$  wurde in Kapitel 5.2.2.1 erläutert.

$$Em_{HS} = k_{HS} \cdot P_{HS,max} \quad (5.13)$$

### 5.3.5. Luft-Wasser-Wärmepumpe

Aufbauend auf den in Kapitel 3.1.1 beschriebenen Modellansätzen wird die Luft-Wasser-Wärmepumpe in dieser Arbeit wie folgt abgebildet. Die Luft-Wasser-Wärmepumpe wird als reversibel betreibbar angenommen, wenn ein Kühlbedarf besteht. Dazu kann die Summe aus Heizleistung und der über COP und EER umgerechneten Kühlleistung die maximale Leistung nicht überschreiten. Dies verhindert, dass gleichzeitig mit maximaler Leistung gekühlt und geheizt werden kann.

$$\dot{Q}_{L-W-WP,H}(t) + \dot{Q}_{L-W-WP,K}(t) \cdot \frac{COP(t)}{EER(t)} \leq \dot{Q}_{L-W-WP,max} \quad (5.14)$$

COP und EER werden entsprechend dem in Kapitel 3.1.1 beschriebenen linearen Modellansatz temperaturabhängig berechnet. Aufgrund des Einsatzes von Flächensystemen und des Verzichts auf Radiatoren wird hierbei eine konstante Kondensatorvorlauftemperatur von 40 °C angesetzt (vgl. Kapitel 3.3.3). Die dafür verwendeten Kennwerte entstammen der hplib-Bibliothek [TJA21].

Die Emissionen, die mit der Herstellung verbunden sind, werden linear in Abhängigkeit von der Komponentengröße ( $\dot{Q}_{L-W-WP,max}$ ) berechnet. Der hierfür verwendete lineare Emissionsfaktor  $k$  wurde in Kapitel 5.2.2.1 erläutert.

$$Em_{L-W-WP} = \dot{Q}_{L-W-WP,max} \cdot k_{L-W-WP} \quad (5.15)$$

Die Heizleistung der Wärmepumpe ist das Produkt aus COP und elektrischer Leistung ( $P_{L-W-WP,H}$ ):

$$\dot{Q}_{L-W-WP,H}(t) = COP(t) \cdot P_{L-W-WP,H}(t) \quad (5.16)$$

Die Kühlleistung der Wärmepumpe ist das Produkt aus EER und elektrischer Leistung ( $P_{L-W-WP,K}$ ):

$$\dot{Q}_{L-W-WP,K}(t) = EER(t) \cdot P_{L-W-WP,K}(t) \quad (5.17)$$

### 5.3.6. Sole-Wasser-Wärmepumpe

Aufbauend auf den in Kapitel 3.1.1 dargestellten Modellansätzen wird die Sole-Wasser-Wärmepumpe in dieser Arbeit mit einem konstanten COP abgebildet. Dies ist möglich, da die Quelltemperatur des Erdreichs im Vergleich zur Außenluft deutlich konstanter ist, wodurch der Einfluss von Temperaturvariationen auf die Leistungszahl stark reduziert wird [QUA23; BÖC17]. Aufgrund des Einsatzes von Flächensystemen und des Verzichts auf Radiatoren wird für die Modellierung eine konstante Kondensatorvorlauftemperatur von 40 °C angesetzt (vgl. Kapitel 3.3.3). Der COP wird auf Grundlage des generischen Ansatzes einer nicht modulierenden Sole-Wasser-Wärmepumpe mit dieser Kondensatorvorlauftemperatur mithilfe der hplib-Bibliothek berechnet [TJA21]. Für diese Arbeit ergibt sich daraus ein konstanter Wert von 5,16.

Die Heizleistung der Sole-Wasser-Wärmepumpe ( $\dot{Q}_{S-W-WP,H}$ ) wird durch die gewählte Komponentengröße ( $\dot{Q}_{S-W-WP,max}$ ) begrenzt:

$$\dot{Q}_{S-W-WP,H}(t) \leq \dot{Q}_{S-W-WP,max} \quad (5.18)$$

Die Emissionen, die mit der Herstellung verbunden sind, werden – analog zur Luft-Wasser-Wärmepumpe – linear von der Komponentengröße ( $\dot{Q}_{S-W-WP,max}$ ) abhängig modelliert. Der hierfür verwendete lineare Emissionsfaktor  $k$  wurde in Kapitel 5.2.2.1 erläutert:

$$Em_{S-W-WP} = \dot{Q}_{S-W-WP,max} \cdot k_{S-W-WP} \quad (5.19)$$

Die Heizleistung ergibt sich aus dem Produkt von COP (5,16) und elektrischer Leistung ( $P_{S-W-WP}$ ):

$$\dot{Q}_{S-W-WP,H}(t) = COP \cdot P_{S-W-WP}(t) \quad (5.20)$$

Außerdem ergibt die Summe aus elektrischer Leistung und Kälteleistung ( $\dot{Q}_{S-W-WP,K}$ ) die Heizleistung:

$$\dot{Q}_{S-W-WP,H}(t) = P_{S-W-WP}(t) + \dot{Q}_{S-W-WP,K}(t) \quad (5.21)$$

### 5.3.7. Geothermie

Die Abbildung der Geothermieanlage basiert auf dem g-Funktionsmodell von Blanke et. al. [BLA24a] (vgl. Kapitel 3.1.3.2).

Für die Berechnungen werden folgende Annahmen getroffen:

- Minimale Fluidtemperatur: 0 °C [VDI19]
- Maximale Fluidtemperatur: 17 °C [PEE25; BLO22]
- Thermischer Bohrlochwiderstand: 0,05 m K/W [BLA21c]
- Bohrlochradius: 0,075 m [BLA21c]
- Wärmeleitfähigkeit des Erdreichs: 2,1 W/(m K) (typischer Wertebereich: 1 W/(m K) bis 5 W/(m K), vgl. VDI 4640 [VDI19; DAL20])
- Wärmekapazität des Erdreichs: 2100 kJ/(m<sup>3</sup> K) (typischer Wertebereich: 1,5 MJ/(m<sup>3</sup> K) bis 3 MJ/(m<sup>3</sup> K), vgl. Dalla Santa et al. [DAL20])
- Standortabhängige ungestörte Erdreichtemperatur und Wärmefluss aus Xing et al. [XIN14]
- Homogenes Erdreich, konstante Stoffwerte, keine Grundwasserströmung [PEE21]

Auf Basis dieser Annahmen ergeben sich die folgenden Gleichungen:

Zunächst werden die monatlichen (m) Durchschnittswerte für die dem Erdreich entzogene und hinzugefügte Energie berechnet ( $\dot{Q}_{Geo,L}$ ,  $\dot{Q}_{Geo,E}$ ):

$$\dot{Q}_M^+(m) = \frac{\sum_{i=730 \cdot (m-1)}^{730 \cdot m} \dot{Q}_{Geo,E}(i)}{730} \quad (5.22)$$

$$\dot{Q}_M^-(m) = \frac{\sum_{i=730 \cdot (m-1)}^{730 \cdot m} \dot{Q}_{Geo,L}(i)}{730} \quad (5.23)$$

Die Differenz aus diesen beiden Monatsmittelwerten wird mit der g-Funktion ( $g^*$ ) gefaltet [ESK87; JAV11].

$$\Delta \dot{Q}_{M,con} = \left( \dot{Q}_M^+(m) - \dot{Q}_M^-(m) \right) * \Delta g^* \quad (5.24)$$

Das Ergebnis dieser Faltung ( $\Delta \dot{Q}_{M,con}$ ) kann genutzt werden, um mittels der maximalen ( $\Delta T_{max}$ ) und minimalen Temperaturdifferenz zwischen Fluid und Erdreich ( $\Delta T_{min}$ ), multipliziert mit der totalen Bohrlochlänge ( $L \cdot N$ ), die minimale ( $\dot{Q}_{min}$ ) und maximale Leistung ( $\dot{Q}_{max}$ ) zu berechnen. Neben dem Faltungsergebnis werden noch die Wärmeleitfähigkeit des Erdreiches ( $\lambda_{Erde}$ ), die g-Funktion für die Peakleistung ( $g_p$ ) und der thermische Bohrlohrwiderstand ( $R_b$ , vgl. Kapitel 3.1.3.1) benötigt.

$$\begin{aligned} \Delta T_{max}(m) \cdot L \cdot N = & \frac{\Delta \dot{Q}_{M,con}(m) + g_p \cdot \dot{Q}_M^-(m)}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_{Erde}} \\ & + \dot{Q}_{max}(m) \cdot \left( \frac{g_p}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_{Erde}} + R_b \right) \quad \forall m \end{aligned} \quad (5.25)$$

$$\begin{aligned} \Delta T_{min} \cdot L \cdot N = & \frac{\Delta \dot{Q}_{M,con}(m) - g_p \cdot \dot{Q}_M^+(m)}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_{Erde}} \\ & + \dot{Q}_{min}(m) \cdot \left( \frac{g_p}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_{Erde}} + R_b \right) \quad \forall m \end{aligned} \quad (5.26)$$

Diese minimale und maximale Leistung begrenzen dann die dem Erdreich zuführbare oder entziehbare Energiemenge:

$$\dot{Q}_{min}(m(t)) \leq \dot{Q}_{Geo,E}(t) - \dot{Q}_{Geo,L}(t) \leq \dot{Q}_{max}(m(t)) \quad (5.27)$$

Die Herstellungsemissionen ergeben sich linear aus der totalen Länge des Bohrfeldes. Der lineare Emissionsfaktor  $k$  wurde in Kapitel 5.2.2.1 erläutert.

$$Em_{Geo} = L \cdot N \cdot k_{Geo} \quad (5.28)$$

### 5.3.8. Thermische und elektrische Speicher

Die Emissionen des Speichers hängen linear von der maximalen Speicherkapazität ( $E_{\max}$ ) ab und setzen sich aus einem linearen Faktor ( $k$ ) sowie einem Achsenabschnitt ( $b_{\text{Sp}}$ ) zusammen (vgl. Kapitel 5.2.2.1). Der Achsenabschnitt wird nur berücksichtigt, wenn die binäre Variable  $b_{\text{Speicher}}$  den Wert eins annimmt, d. h. wenn tatsächlich ein Speicher eingesetzt wird.

$$E_{m_{\text{Sp}}} = k_{\text{Sp}} \cdot E_{\max} + b_{\text{Speicher}} \cdot b_{\text{Sp}} \quad (5.29)$$

Die maximale Speicherkapazität kann also nur größer als null sein, wenn die Emissionen für den Achsenabschnitt berücksichtigt werden, also die binäre Variable eins ist. Dazu werden diese zur Multiplikation aus der Binärvariablen und der maximal wählbaren Speichergroße ( $E_{\text{total}}$ ) begrenzt.

$$E_{\max} \leq b_{\text{Speicher}} \cdot E_{\text{total}} \quad (5.30)$$

Die Gleichungen für die Abbildung der Speicher für die typischen Perioden sind Blanke et al. [BLA22] entnommen. Das Modell nimmt eine Speicherdifferenz von der letzten zur nächsten typischen Periode ( $\Delta E$ ) an. Diese kann entweder über die Ladeleistung erhöht oder mit der Entladeleistung verringert werden. Außerdem wird eine Selbstentladung ( $\eta_{\text{selbst}} \cdot \delta t$ ) des Speichers und eine Lade- ( $\eta_{\text{Laden}}$ ) und Entladeeffizienz ( $\eta_{\text{Entladen}}$ ) berücksichtigt. Für den elektrischen Speicher beträgt die Selbstentladung 0,2 %/Tag und die Lade-/Entladeeffizienz 96 % (vgl. Kapitel 3.2.2). Für den warmen Pufferspeicher Speicher beträgt die Selbstentladung 2,4 %/Tag und die Lade-/Entladeeffizienz 99 % (vgl. Kapitel 3.2.1). Für den kalten Pufferspeicher werden Selbstentladung sowie Lade- und Entladeverluste nicht berücksichtigt, da die Optimierung diese andernfalls dazu nutzen könnte, Energie durch Be- und Entladen künstlich zu dissipieren.

$$\Delta E(t) = \Delta E(t-1) \cdot (1 - \eta_{\text{selbst}} \cdot \delta t) + \left( P_{\text{Laden}}(t) \cdot \eta_{\text{Laden}} - \frac{P_{\text{Entladen}}(t)}{\eta_{\text{Entladen}}} \right) \cdot \delta t \quad (5.31)$$

Der Speicherstatus für die neue typische Periode ( $p$ ) ergibt sich aus der vorherigen typischen Periode, welche nicht dieselbe wie die neue ist, und dem Speicherstatus am Ende der aktuellen typischen Periode ( $\Delta E(t = N_p)$ ) multipliziert mit einem Faktor  $F$ , welcher die Selbstentladung über die aktuelle typische Periode berücksichtigt:

$$E_p = E_{p-1} \cdot (1 - \eta_{\text{selbst}} \cdot \delta^\dagger)^{N_p \cdot M} + \Delta E(t = N_p) \cdot F \quad (5.32)$$

Dieser Faktor ( $F$ ) kann über die Anzahl an gleichen typischen Perioden der aktuellen typischen Periode in Folge ( $M$ ) wie folgt bestimmt werden:

$$F = \sum_{i=0}^{M-1} \left( (1 - \eta_{\text{selbst}} \cdot \delta^\dagger)^{N_p} \right)^i = \frac{1 - (1 - \eta_{\text{selbst}} \cdot \delta^\dagger)^{N_p \cdot M}}{1 - (1 - \eta_{\text{selbst}} \cdot \delta^\dagger)^{N_p}} \quad (5.33)$$

Mit diesem Faktor und der Selbstentladung kann dann wie folgt sichergestellt werden, dass der Speicherstatus zwischen Entladen und der maximalen Speicherkapazität bleibt:

$$\begin{aligned} 0 \leq E_{p-1} \cdot \frac{(1 - \eta_{\text{selbst}} \cdot \delta^\dagger)^{N_p \cdot M}}{(1 - \eta_{\text{selbst}} \cdot \delta^\dagger)^{N_p \cdot F}} \cdot (1 - \eta_{\text{selbst}} \cdot \delta^\dagger)^\dagger \\ + \frac{E_p \cdot \left(1 - \frac{1}{F}\right)}{(1 - \eta_{\text{selbst}} \cdot \delta^\dagger)^{N_p}} \cdot (1 - \eta_{\text{selbst}} \cdot \delta^\dagger)^\dagger + \Delta E(t) \leq E_{\text{max}} \end{aligned} \quad (5.34)$$

Wenn keine typische Perioden verwendet werden, werden die Gleichungen (5.31) bis (5.34) durch folgende Gleichungen ersetzt. Die Gleichung 5.35 bestimmt die Lade- und Entladeleistungen.

$$E(t) = E(t - 1) \cdot (1 - \eta_{\text{selbst}} \cdot \delta^\dagger) + \left( P_{\text{Laden}}(t) \cdot \eta_{\text{Laden}} - \frac{P_{\text{Entladen}}(t)}{\eta_{\text{Entladen}}} \right) \cdot \delta^\dagger \quad (5.35)$$

Die Gleichung 5.36 limitiert die gespeicherte Energiemenge:

$$0 \leq E(t) \leq E_{\max} \quad (5.36)$$

### 5.3.9. Photovoltaik

Die PV-Anlage wird mittels drei Gleichungen abgebildet. Die erste verbindet die Fläche der PV ( $A_{PV}$ ) mit deren genutzten Energiemenge ( $P_{pv}$ ) über die flächen-spezifisch maximal produzierbare Energiemenge ( $f_{PV}$ ), welche wie in Kapitel 5.1.4 bestimmt wird.

$$P_{pv}(t) \leq f_{PV}(t) \cdot A_{PV} \quad (5.37)$$

Die Fläche der PV-Anlage ( $A_{PV}$ ) wird mit ihren Emissionen linear über den Faktor  $k_{PV}$  verbunden. Der lineare Emissionsfaktor  $k$  wurde in Kapitel 5.2.2.1 erläutert.

$$Em_{PV} = A_{PV} \cdot k_{PV} \quad (5.38)$$

Die Energiemenge, welche maximal verkauft werden kann, ist limitiert auf die von der PV erzeugten Energiemenge:

$$P_{\text{verkauf}}(t) \leq P_{pv}(t) \quad (5.39)$$

### 5.3.10. Einstellungen vom Optimierer

Die Implementierung der Optimierung erfolgte in Python. Die Skripte wurden anhand von Validierungsfällen überprüft. Zur Lösung des MILP wird der Optimierer von Gurobi verwendet [GUR25]. Hier wird auf Version 10.0 zurückgegriffen. Es werden zwei Threads, ein Zeitlimit von 3600 s, ein MIP-GAP von 0.01, ein Pre-Solve-Wert von 1 und ein Heuristikwert von 0.01 verwendet. Diese Einstellungen erlauben ein paralleles Rechnen der verschiedenen Varianten und gleichzeitig eine schnelle Konvergenz mit einem geringen Fehler von unter 1 % gegenüber einer vollständigen Konvergenz zum Minimum (vgl. Kapitel 2.6).

## 5.4. Auswertung

Zur Darstellung der Ergebnisse werden die Resultate der Optimierung bezüglich der Gesamtemissionen, der Dämmstärke und der Speichergrößen ausgewertet. Für jede Gebäudetechnikvariante entstehen 256 (bzw. 512 im Fall des Einfamilienhauses) Ergebnisdatensätze, da die Lastprofile entsprechend viele Sensitivitätsszenarien abbilden (vgl. Kapitel 5.1.2). Um diese Vielzahl an Ergebnissen darzustellen, werden die Daten zu Violinplots sowie darin integrierte Boxplots zusammengefasst. Abbildung 5.9 veranschaulicht, wie die Ergebnisgrafiken erstellt werden. Dazu sind in der linken Grafik die 256 Sensitivitätsfälle nach Höhe des Emissionswertes sortiert für einen Beispielfall dargestellt. Die einzelnen Werte stellen eine der 256/512 Sensitivitäten dar. Horizontale Linien repräsentieren den Mittelwert sowie den Median, den Minimal- und Maximalwert, das 1. Quartil und das 3. Quartil. Mit diesen Daten lässt sich dann der rechts in weiß dargestellte Boxplot erstellen. Die vertikale schwarze Linie im Zentrum den Boxplots stellt den Median und die horizontale Linie den Mittelwert dar. Aus der Dichteverteilung der Daten lässt sich dann der rechte Violin-Plot erstellen. Je geringer die Steigung in der linken Grafik ausfällt, desto breiter ist der Mittelbereich der Violin-Darstellung in der rechten Grafik. Diese Darstellung kombiniert die Verteilungsdichte eines Datensatzes mit einer statistischen Zusammenfassung und erlaubt somit viele Daten komprimiert darzustellen.

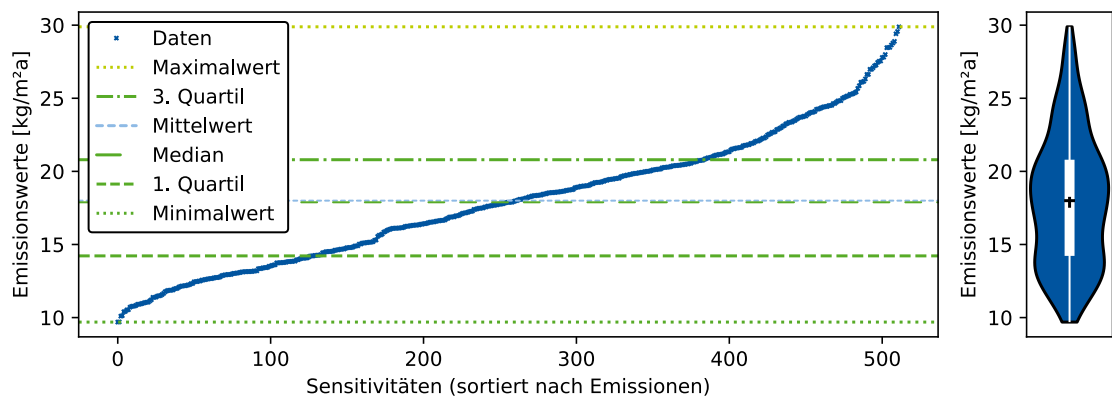


Abbildung 5.9.: Erklärung der Ergebnisgrafiken anhand von sortierten Ergebnissensitivitäten mit wichtigen Kenngrößen (links) und einem Violin-Plot mit integriertem Boxplot (rechts)

## 6. Ergebnisse und Diskussion

Im folgenden Kapitel werden die Ergebnisse zur Untersuchung der Forschungshypothesen (vgl. Kapitel 1.3) dargestellt und interpretiert. Grundlage der Analyse ist die in Kapitel 5 beschriebene gemischt-ganzzahlige lineare Optimierung, in der Dämmstärken, Speichergrößen und Varianten der Gebäudetechnik so dimensioniert werden, dass die gesamten Treibhausgasemissionen über 50 Jahre minimiert werden.

Analysiert werden vier Gebäudetypen (Wohn-, Büro-, Bildungsgebäude, Gewerbehalle) sowie zwei Quartiere (Wohn- und Gewerbequartier) mit jeweils mehreren Energiesystemvarianten auf Basis elektrisch betriebener Wärmepumpen. Für die Abbildung der Stromsektoremissionen kamen fünf Modellierungsansätze unterschiedlicher zeitlicher Auflösung und Dekarbonisierungspfade zum Einsatz (vgl. Kapitel 4.1).

Die Darstellung der Ergebnisse erfolgt ab Kapitel 6.2 exemplarisch am Einfamilienhaus, da sich die Muster auf die übrigen Gebäudetypen und Quartiere übertragen lassen. In den jeweiligen Unterkapiteln werden die Ergebnisse auf die anderen Gebäudetypen eingeordnet. Im Folgenden wird der Begriff Dämmstärke stets als zusätzliche Dämmstärke zum Gebäudestandard aus Kapitel 5.1.2 verstanden.

### 6.1. Einfluss der Stromsektordekarbonisierung auf die Dämmstärke

Die Haupthypothese H1 postuliert, dass die Dekarbonisierung des Stromsektors die LZA-basierte Dimensionierung der Dämmstärke von Gebäuden mit elektrisch betriebenen Wärmepumpensystemen maßgeblich verändert (vgl. Kapitel 4.1). Im Folgenden werden die Ergebnisse für verschiedene Gebäudetypen vorgestellt und hinsichtlich der Auswirkungen dekarbonisierter Stromsektorszenarien auf die optimale Dämmstärke diskutiert.

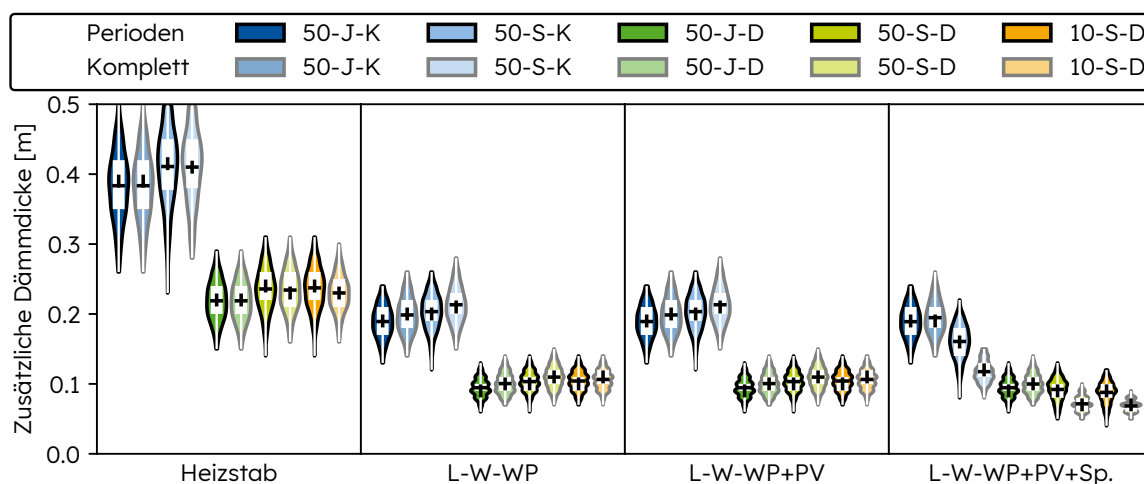
### 6.1.1. Einfamilienhaus

Das Einfamilienhaus dient als Referenzfall mit hoher Relevanz aufgrund des hohen Anteils im Bestand und Neubau. Abbildung 6.1 zeigt die Ergebnisse für das Einfamilienhaus, aufgeteilt in zwei Unterabbildungen. Abbildung 6.1a zeigt den reinen Heizfall und Abbildung 6.1b den kombinierten Heiz- und Kühlfall. Dargestellt sind Violinplots mit integriertem Boxplot (vgl. Kapitel 5.4). Jede der acht Gebäudetechnikvarianten (vgl. Kapitel 5.3.2) ist separat dargestellt. Innerhalb jeder Variante sind die fünf Modellierungsansätze des Stromsektors (vgl. Kapitel 4.1) sowohl für die Ganzjahresoptimierung als auch für die vereinfachte Optimierung mit typischen Perioden abgebildet.

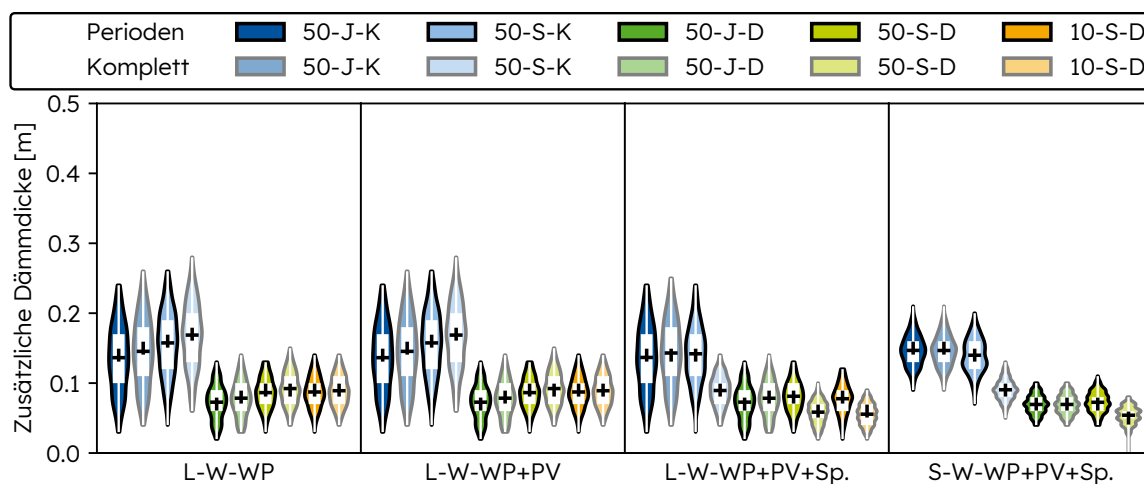
Für den Heizstab als alleinige Wärmeversorgung zeigen sich keine nennenswerten Unterschiede zwischen typischen Perioden und Ganzjahresbetrachtung. Der größte Einfluss resultiert aus der Dekarbonisierung. Sie reduziert die mittlere zusätzliche Dämmstärke von etwa 0,41 m (J-K) auf ca. 0,23 m (J-D bzw. S-D). Die stündliche Auflösung der Emissionen verändert die Ergebnisse dagegen kaum ( $\pm 0,02$  m).

Mit einer Luft-Wasser-Wärmepumpe (L-W-WP) zeigt sich ein ähnliches Muster, jedoch auf deutlich niedrigerem Niveau. Die mittlere Dämmstärke halbiert sich von rund 0,21 m (J-K) auf etwa 0,10 m (J-D/S-D). Auch die Ergänzung um eine PV-Anlage verändert die Ergebnisse nicht wesentlich, da deren Erzeugungsschwerpunkt im Sommer liegt und somit wenig zur Deckung des winterlichen Heizbedarfs beiträgt.

Werden thermische und elektrische Speicher in das Energiesystem integriert, sinkt die Dämmstärke in den Szenarien mit stündlich aufgelösten Emissionen nochmals um bis zu 0,03 m. So ergibt sich beispielsweise im Heizfall mit L-W-WP+PV+Speicher eine mittlere Dämmstärke von nur 0,07 m (S-D), während im J-Szenario noch 0,12 m optimiert wird. Typische Perioden liefern hier allerdings keine verlässliche Approximation. Abweichungen von mehr als 0,05 m gegenüber der Ganzjahressimulation sind erkennbar, was im Wesentlichen auf die vereinfachte Abbildung der Speicher in typischen Perioden zurückzuführen ist. Da Speicherladungen und -entladungen nicht vollständig über die Grenzen einzelner Perioden hinweg erfasst werden, können sich kumulative Fehler ergeben, die in der



(a) Heizen



(b) Heizen + Kühlen

Abbildung 6.1.: Optimale Dämmstärken für das Einfamilienhaus in Abhängigkeit von Betriebsfall (nur Heizen bzw. Heizen + Kühlen), Gebäudetechnikvariante sowie den Modellierungsansätzen für den Stromsektor als Violinplots mit integriertem Boxplot für Optimierungen über ein volles Jahr sowie über typische Perioden

Ganzjahressimulation nicht auftreten.

Im kombinierten Heiz- und Kühlfall vergrößert sich die Streuung der Ergebnisse deutlich, während Median und Mittelwert der Dämmstärken im Vergleich zum Heizfall meist um etwa 0,05 m sinken. Ursache ist der Zielkonflikt zwischen re-

duzierter Heizlast und erhöhter Kühllast bei stärkerer Dämmung. So beträgt die mittlere Dämmstärke für die L-W-WP im J-K-Fall rund 0,17 m, im S-D-Fall dagegen nur noch 0,09 m. Mit PV und Speicher sinkt die mittlere Dämmstärke in den S-D-Szenarien sogar auf 0,06 m. Die Sole-Wasser-Wärmepumpe zeigt dabei die geringste Streuung, da ihr Wirkungsgrad unabhängig von der Außentemperatur ist. Die mittlere Dämmstärke liegt hier bei rund 0,09 m (J-K) und 0,05 m (S-D). Der 10-S-D-Fall ist nicht darstellbar, da das Geothermiesondenmodell konstante Entzugsprofile voraussetzt.

Insgesamt zeigt sich für das Einfamilienhaus, dass sich die optimale Dämmstärke durch Dekarbonisierung in allen Varianten halbiert. Der Unterschied zwischen J- und S-Szenarien ist gering, bestätigt jedoch die Robustheit der Ergebnisse. Speicher führen zu einer weiteren Reduktion, während typische Perioden die tatsächlichen Werte bei Speicherfällen deutlich unterschätzen.

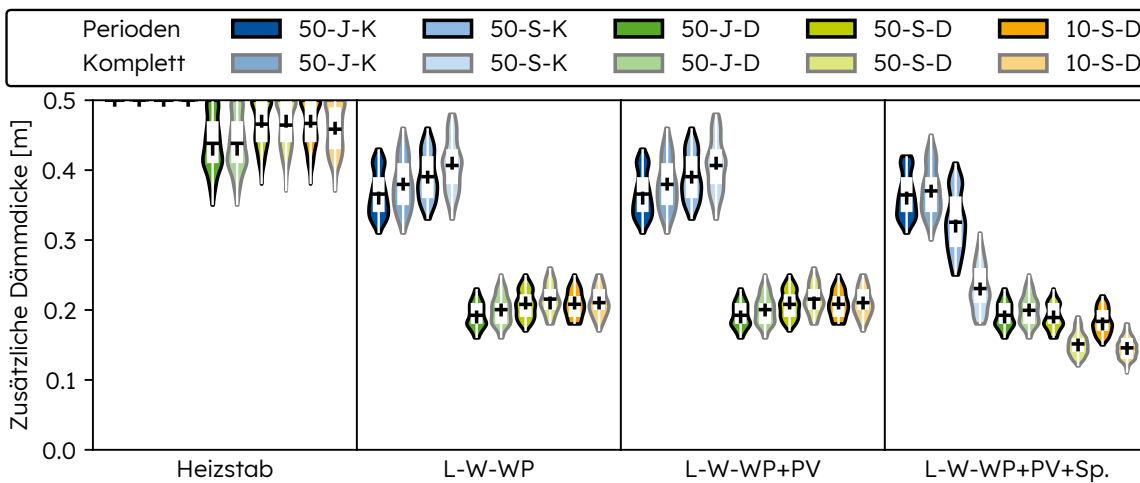
Damit wird die Haupthypothese H1 bestätigt, dass die Dekarbonisierung einen wesentlichen Einfluss auf die optimale Dämmstärke hat.

### **6.1.2. Bürogebäude**

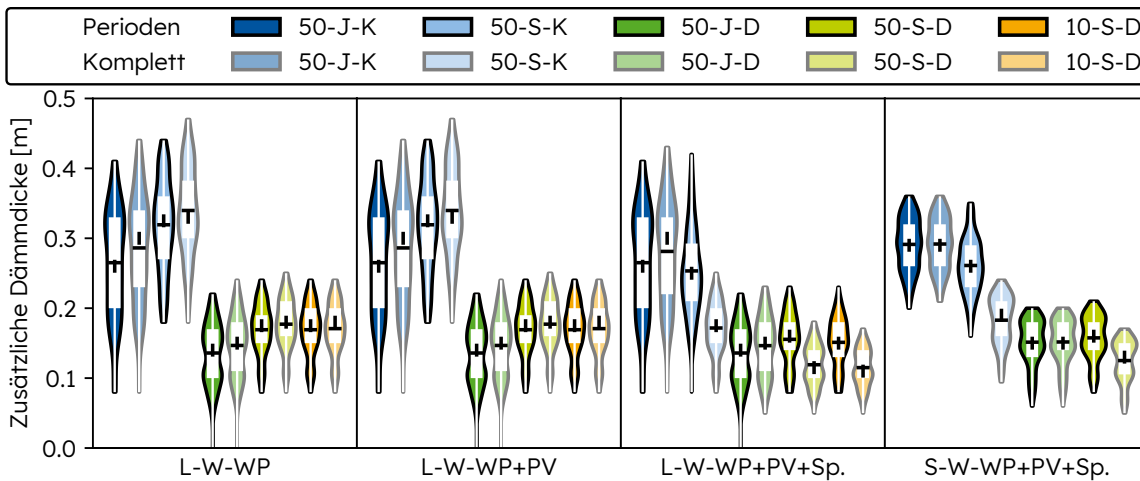
Bürogebäude zeichnen sich durch ein günstiges Oberflächen-zu-Volumen-Verhältnis sowie hohe interne Wärmegewinne aus, wodurch sich charakteristisch andere Anforderungen an die Dämmung und Gebäudetechnik ergeben (vgl. Kapitel 5.1.2). Abbildung 6.2 zeigt die Ergebnisse für das Bürogebäude und ist analog zur Abbildung für das Einfamilienhaus aufgebaut. Wie dort folgt das optimale Dämmniveau ähnlichen Mustern, liegt jedoch auf insgesamt höherem Niveau. Ursachen dafür sind das günstigere Oberflächen-zu-Volumen-Verhältnis sowie höhere interne Wärmequellen, die den Heizwärmebedarf reduzieren.

Besonders deutlich wird dies im Heizstab-Szenario ohne Dekarbonisierung. Hier liegt die mittlere Dämmstärke bei 0,50 m, also exakt am Maximalwert. Selbst mit Dekarbonisierung bleiben die Mittelwerte hoch (J-D: 0,44 m, S-D: 0,46 m), sodass dieser Fall als nicht praxisrelevant einzustufen ist, da die resultierenden Dämmstärken ökonomisch nicht realistisch sind.

Für die Luft-Wasser-Wärmepumpe (L-W-WP) liegen die mittlere Dämmstärken im reinen Heizfall bei rund 0,39 m (J-K) ohne Dekarbonisierung und reduzieren



(a) Heizen



(b) Heizen + Kühlen

Abbildung 6.2.: Optimale Dämmstärken für das Bürogebäude in Abhängigkeit von Betriebsfall (nur Heizen bzw. Heizen + Kühlen), Gebäudetechnikvariante sowie den Modellierungsansätzen für den Stromsektor als Violinplots mit integriertem Boxplot für Optimierungen über ein volles Jahr sowie über typische Perioden

sich durch Dekarbonisierung auf 0,20 m (J-D/S-D). Damit ist das Niveau doppelt so hoch wie beim Einfamilienhaus. Mit PV zeigt sich nahezu kein Unterschied, während Speicher im Dekarbonisierungsszenario eine weitere Absenkung ermöglichen, sodass die mittlere Dämmstärke im S-D-Fall bis auf 0,15 m sinkt.

Im kombinierten Heiz- und Kühlfall verringern sich die mittleren Dämmstärken um rund 5 cm. So ergibt sich für die L-W-WP etwa 0,34 m (J-K) und 0,17 m (J-D/S-D). Mit PV und Speicher reduziert sich die mittlere Dämmstärke im S-D-Szenario auf 0,12 m. Die Sole-Wasser-Wärmepumpe weist in diesem Fall die geringste Streuung auf, was auf ihre Unabhängigkeit von der Außentemperatur zurückzuführen ist.

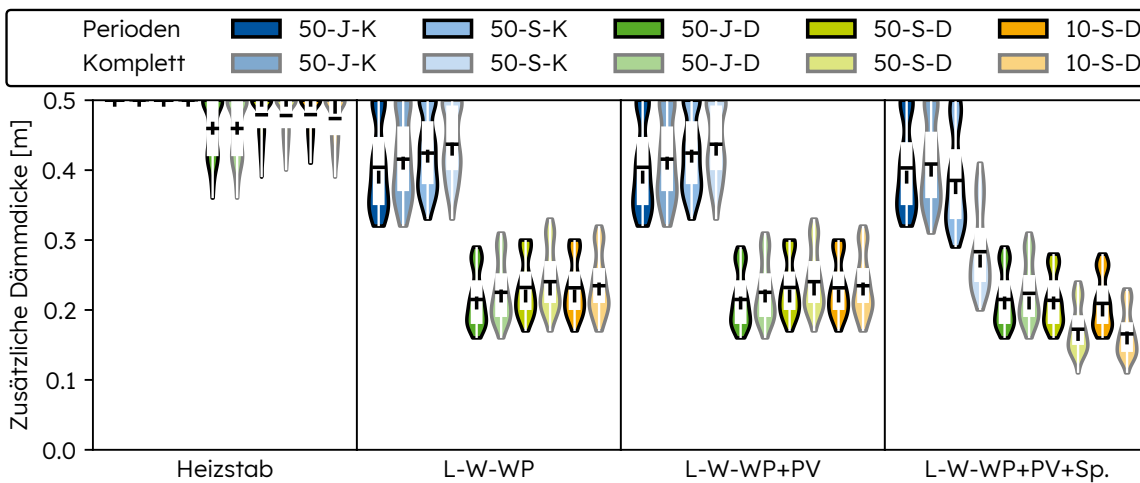
Verglichen mit dem Einfamilienhaus ist die Streuung im kombinierten Heiz- und Kühlfall größer. Dies liegt daran, dass der Kühlbedarf einen höheren Anteil am Gesamtenergiebedarf ausmacht und die Sensitivitäten stärker beeinflusst.

Insgesamt zeigt sich für das Bürogebäude, dass ohne Dekarbonisierung die mittlere Dämmstärken auf einem sehr hohen Niveau von bis zu 0,50 m liegen. Mit Dekarbonisierung halbiert sich die mittlere Dämmstärke in allen Varianten auf etwa 0,20 m. Speicher können die Dämmstärke in den S-D-Szenarien nochmals um 3–5 cm reduzieren. Typische Perioden überschätzen die Dämmstärken im Speicherfall deutlich, wie etwa beim Fall L-W-WP+PV+Speicher, wo im J-K-Szenario eine mittlere Dämmstärke von 0,27 m ermittelt wird, während die Ganzjahressimulation nur 0,12 m ergibt.

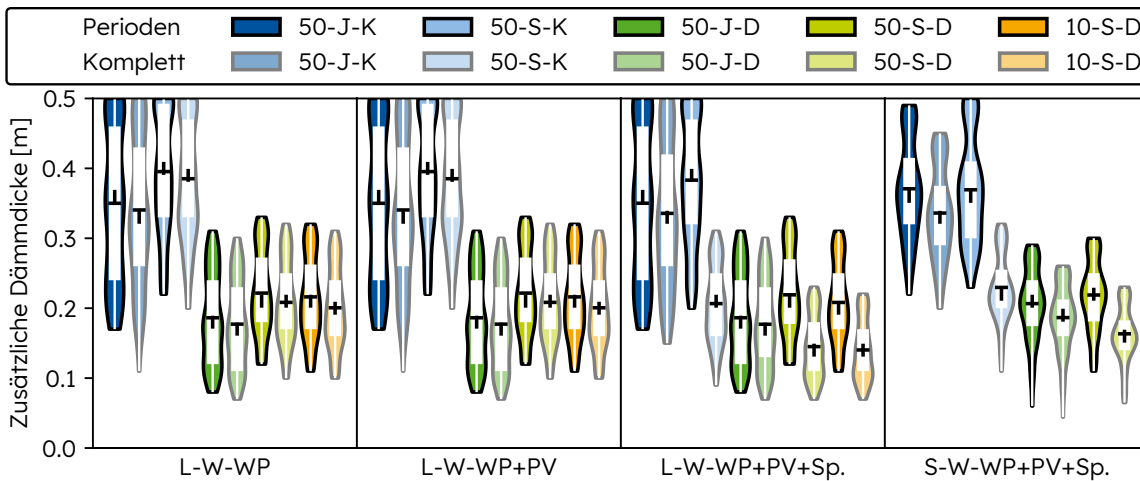
Damit bestätigt auch das Bürogebäude die Haupthypothese H1, dass die Dekarbonisierung einen wesentlichen Einfluss auf die optimale Dämmstärke hat, in diesem Fall sogar noch ausgeprägter als beim Einfamilienhaus.

### **6.1.3. Bildungsgebäude**

Bildungsgebäude sind durch eine hohe Belegungsdichte, ausgeprägte interne Wärmequellen sowie einen teilweise erheblichen Kühlbedarf geprägt, was sie zu einem wichtigen Anwendungsfall für die Untersuchung der Dämmstärke macht (vgl. Kapitel 5.1.2). Abbildung 6.3 zeigt die Ergebnisse für das Bildungsgebäude und ist analog zur Darstellung für das Einfamilienhaus aufgebaut. Das Dämmniveau liegt insgesamt höher als beim Einfamilienhaus und beim Bürogebäude. In einigen Varianten erreicht die mittlere Dämmstärke den Maximalwert von 50 cm. Werte oberhalb von 35 cm sind allerdings als theoretisch zu betrachten, da sie in der Praxis aufgrund hoher Investitionskosten in der Regel nicht wirtschaftlich sind.



(a) Heizen



(b) Heizen + Kühlen

Abbildung 6.3.: Optimale Dämmstärken für das Bildungsgebäude in Abhängigkeit von Betriebsfall (nur Heizen bzw. Heizen + Kühlen), Gebäude-technikvariante sowie den Modellierungsansätzen für den Stromsektor als Violinplots mit integriertem Boxplot für Optimierungen über ein volles Jahr sowie über typische Perioden

Die Resultate sind konsistent mit den Beobachtungen beim Einfamilienhaus. Im Heizstab-Szenario ohne Dekarbonisierung liegt die mittlere Dämmstärke konstant bei 0,50 m, während sie sich mit Dekarbonisierung auf etwa 0,46 m (S-D) reduziert. Für die Luft-Wasser-Wärmepumpe ergibt sich ohne Dekarbonisierung im Mittel ein Niveau von rund 0,42 m (J-K), das sich durch Dekarbonisierung auf

etwa 0,23 m halbiert. Mit PV bleibt das Ergebnis nahezu identisch. Die Integration eines Speichers senkt die mittlere Dämmstärke in den dekarbonisierten Fällen nochmals, sodass im S-D-Szenario nur noch 0,17 m erreicht werden.

Im kombinierten Heiz- und Kühlfall verringert sich das mittlere Dämmniveau im Vergleich zum reinen Heizfall um rund 5 cm. Für die L-W-WP liegt das mittlere Dämmniveau dann bei 0,40 m (J-K) und reduziert sich auf etwa 0,21 m (S-D). Mit PV ergeben sich fast identische Werte. Der Einsatz von Speichern bewirkt auch hier eine deutliche Absenkung. Während im S-K-Szenario noch 0,38 m resultieren, sinkt die Dämmstärke im S-D-Szenario auf 0,15 m. Mit der Sole-Wasser-Wärmepumpe zeigt sich eine besonders geringe Streuung, wobei die Dämmstärke von 0,37 m (J-K) auf 0,16 m (S-D) sinkt.

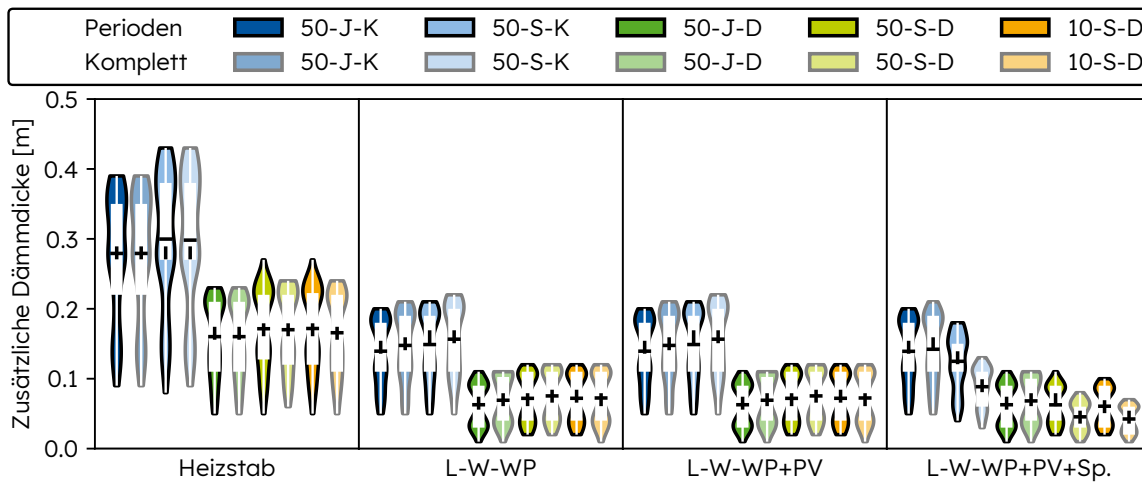
Auffällig ist, dass die Streuung der Ergebnisse insbesondere im kombinierten Heiz- und Kühlfall deutlich größer ist als beim Bürogebäude. Ursache ist der höhere Einfluss der Sensitivitätsvarianten auf den Kühlbedarf, der hier eine größere Rolle im Gesamtenergiebedarf spielt. Außerdem zeigen sich – wie bei den anderen Gebäudetypen – merkliche Unterschiede zwischen Ganzjahressimulation und Optimierung mit typischen Perioden. Während typische Perioden für Varianten ohne Speicher eine brauchbare Approximation liefern, treten im Speicherfall größere Abweichungen auf.

Insgesamt zeigt sich für das Bildungsgebäude, dass die Dekarbonisierung die mittlere Dämmstärke von etwa 0,42 m auf rund 0,22 m halbiert. Damit bestätigt auch dieser Gebäudetyp die Haupthypothese H1, wonach die Dekarbonisierung einen wesentlichen Einfluss auf die optimale Dämmstärke hat.

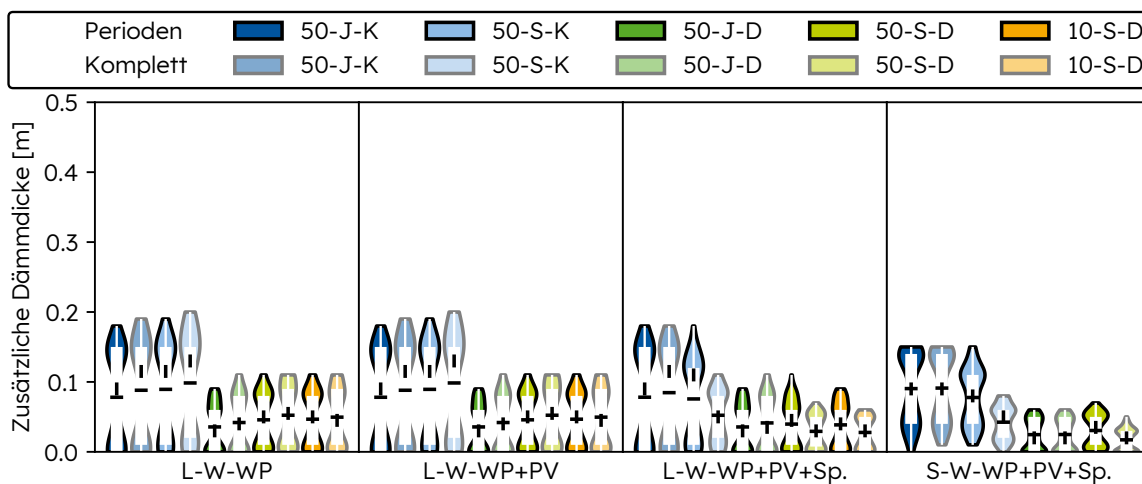
#### **6.1.4. Gewerbehalle**

Gewerbehallen stellen durch ihre große Raumhöhe und das ungünstige Oberflächen-zu-Volumen-Verhältnis einen Sonderfall dar. Typischerweise kommen hier Leichtbaukonstruktionen mit vergleichsweise geringer Dämmstärke zum Einsatz (vgl. Kapitel 5.1.2). Abbildung 6.4 zeigt die Ergebnisse für die Gewerbehalle und ist analog zur Darstellung für das Einfamilienhaus aufgebaut. Das Dämmniveau liegt insgesamt deutlich niedriger als bei den anderen Gebäudetypen. Ursache dafür ist das ungünstige Verhältnis von Gebäudehülle zu Nutzflä-

che, das aus der großen Geschosshöhe von 9 m resultiert.



(a) Heizen



(b) Heizen + Kühlen

Abbildung 6.4.: Optimale Dämmstärken für die Gewerbehalle in Abhängigkeit von Betriebsfall (nur Heizen bzw. Heizen + Kühlen), Gebäudetechnikvariante sowie den Modellierungsansätzen für den Stromsektor als Violinplots mit integriertem Boxplot für Optimierungen über ein volles Jahr sowie über typische Perioden

Im Heizstab-Szenario ohne Dekarbonisierung liegt die mittlere Dämmstärke bei etwa 0,30 m, während sie sich mit dekarbonisierten Daten auf rund 0,17 m reduziert. Mit einer Luft-Wasser-Wärmepumpe ergibt sich ohne Dekarbonisierung

im Mittel ein Niveau von 0,15 m (J-K), das sich mit Dekarbonisierung auf etwa 0,07 m halbiert. PV verändert die Ergebnisse kaum, während die Integration eines Speichers in den dekarbonisierten Szenarien die mittlere Dämmstärke nochmals reduziert, sodass im S-D-Szenario nur noch Werte von rund 0,04 m erreicht werden.

Im kombinierten Heiz- und Kühlfall sinkt das Dämmniveau nochmals deutlich. Für die L-W-WP ergeben sich im nicht dekarbonisierten Fall mittlere Dämmstärken von rund 0,09 m, die sich mit Dekarbonisierung auf etwa 0,04 m reduzieren. Mit PV bleiben die Ergebnisse nahezu identisch, während durch den Einsatz von Speichern Werte von nur noch 0,03 m resultieren. In einzelnen Szenarien wird sogar vollständig auf zusätzliche Dämmung verzichtet, da die internen Gewinne die Wärmeverluste über die Hülle übersteigen. Eine solch niedrige Dämmstärke ergibt in gängigen Hallenkonstruktionen einen U-Wert, welcher das GEG typischerweise nicht zulässig ist. Besonders die Varianten mit Sole-Wasser-Wärmepumpe zeigen hier sehr niedrige Werte, die im S-D-Szenario im Mittel nur noch bei 0,02 m liegen.

Charakteristisch für die Gewerbehalle sind die zweigipfligen Verteilungen in den Violinplots, die sich aus den stark unterschiedlichen Nutzungsprofilen und variierenden Maximaltemperaturen ergeben. Im Unterschied zu den anderen Gebäudetypen ist die Streuung im reinen Heizfall größer als im kombinierten Heiz- und Kühlfall, was den besonderen Einfluss der Nutzungsvarianten widerspiegelt.

Die grundlegenden Muster entsprechen jedoch denen des Einfamilienhauses. Die Dekarbonisierung reduziert das Dämmniveau erheblich, und typische Perioden liefern für die meisten Varianten eine gute Approximation – mit Ausnahme der Speicherfälle, in denen deutliche Abweichungen zur Ganzjahressimulation auftreten.

Für die Gewerbehalle bestätigt sich somit die Haupthypothese H1, wonach die Dekarbonisierung einen wesentlichen Einfluss auf die optimale Dämmstärke hat. Da sich dieses Muster auch für die übrigen Gebäudetypen zeigt, stützt die Analyse zudem die Zusatzhypothese Z1, die von einer allgemeinen Gültigkeit der Haupthypothese H1 über verschiedene Gebäudetypen hinweg ausgeht.

### 6.1.5. Einfamilienhaussiedlung

Die Einfamilienhaussiedlung erlaubt die Analyse von Aggregationseffekten mehrerer Einzelgebäude. Zudem wird der Vergleich zwischen dezentralen Versorgungslösungen und einer zentralen Quartiersversorgung ermöglicht. (vgl. Kapitel 5.1.3.1) Abbildung 6.5 zeigt die Ergebnisse für die optimale zusätzliche Dämmstärke in der betrachteten Einfamilienhaussiedlung. Die ersten vier Fälle (L-W-WP, L-W-WP+PV, L-W-WP+PV+Sp., S-W-WP+PV+Sp.) stellen eine individuelle Energieversorgung auf Gebäudeebene dar, während im letzten Fall eine zentrale Quartiersversorgung über ein 5GDHC untersucht wird. Betrachtet wird ausschließlich der kombinierte Heiz- und Kühlfall mit Optimierung auf Basis typischer Perioden.

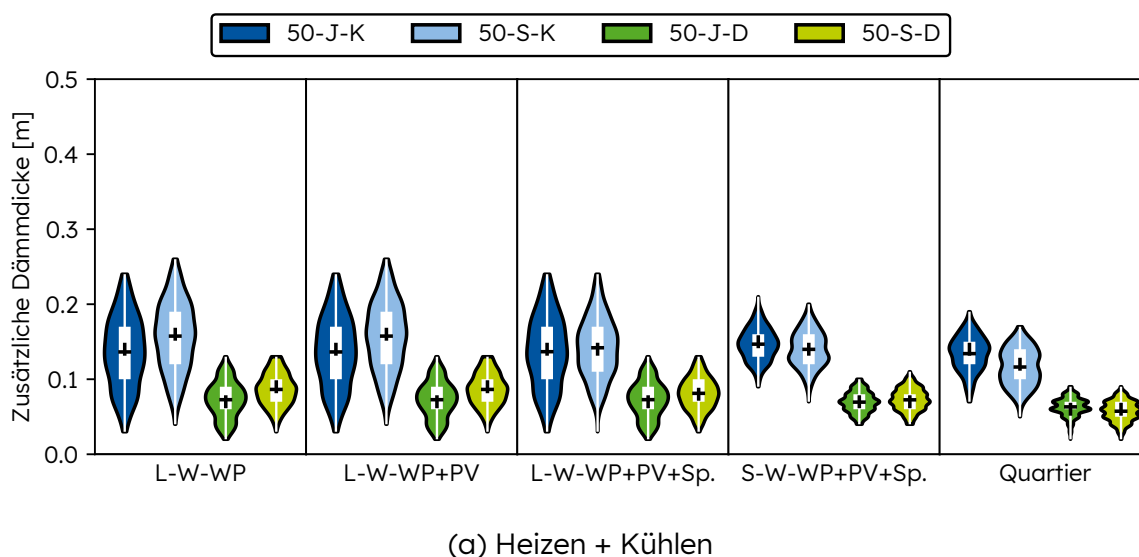


Abbildung 6.5.: Optimale Dämmstärken für die Einfamilienhaussiedlung für den kombinierten Heiz- und Kühlfall in Abhängigkeit der Gebäudetechnikvariante sowie den Modellierungsansätzen für den Stromsektor als Violinplots mit integriertem Boxplot für Optimierungen mit typischen Perioden

Die Abbildung verdeutlicht, dass die erforderlichen zusätzlichen Dämmstärken bei dekarbonisierten Stromsektordaten (D-Fälle) deutlich geringer ausfallen als bei den konstanten Szenarien (K-Fälle). In den L-W-WP-Szenarien liegt die mittlere Dämmstärke bei rund 0,16 m (50-J-K, 50-S-K) und reduziert sich in den De-

karbonisierungsfällen auf etwa 0,07 m (50-J-D, 50-S-D). Damit halbiert sich der Dämmstoffbedarf in den D-Fällen nahezu. Ein ähnlicher Trend zeigt sich auch bei den übrigen dezentralen Versorgungskonzepten.

Die Ergänzung einer PV-Anlage führt nur zu geringfügigen Änderungen: Die mittlere Dämmstärke bleibt in den K-Fällen mit 0,16 m praktisch unverändert, während sie in den D-Fällen leicht von 0,07 m auf 0,06 m absinkt.

Deutlich wird hingegen der Einfluss von Speichern. Für die Variante L-W-WP+PV+Sp. liegt die mittlere Dämmstärke in den K-Fällen bei etwa 0,14 m, in den D-Fällen bei rund 0,08 m.

Die Sole-Wasser-Wärmepumpe mit PV und Speicher zeigt die geringsten Dämmstärken unter den dezentralen Varianten: im Mittel etwa 0,14 m in den K-Fällen und 0,07 m in den D-Fällen. Auffällig ist zudem die geringere Spannweite im Vergleich zu den L-W-WP-Szenarien, was auf den stabileren Wirkungsgrad der S-W-WP zurückzuführen ist.

Das Quartierskonzept mit 5GDHC unterscheidet sich im Ergebnis nur leicht von der individuellen Versorgung mit einer Sole-Wasser-Wärmepumpe. Die mittlere Dämmstärke liegt hier bei 0,12 m in den K-Fällen und 0,06 m in den D-Fällen und ist damit um rund 10 % niedriger als bei der S-W-WP in den K-Fällen und etwa 20 % niedriger in den D-Fällen.

Zusammenfassend lässt sich für die betrachtete Einfamilienhaussiedlung bezüglich der Haupthypothese H1 feststellen, dass die Dekarbonisierung die optimale Dämmstärke in allen untersuchten Varianten deutlich reduziert, während sich die Unterschiede zwischen dezentralen Einzelversorgungen und zentraler Quartierslösung nur moderat auswirken. Damit wird die Zusatzhypothese Z2 ebenfalls bestätigt.

### **6.1.6. Gewerbequartier**

Im Gewerbequartier treten unterschiedliche Gebäudetypen mit heterogenen Lastprofilen zusammen auf. Dadurch können Synergieeffekte sowie die Potenziale zentraler Versorgungssysteme untersucht werden (vgl. Kapitel 5.1.3.1). Abbildung 6.6 zeigt die Ergebnisse für die optimale zusätzliche Dämmstärke im

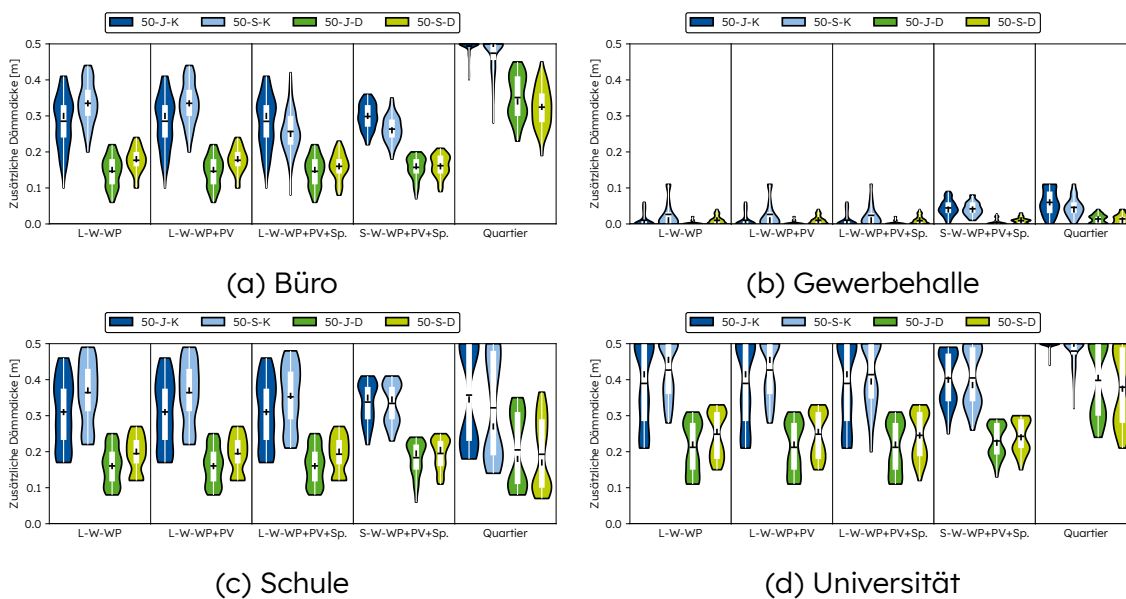


Abbildung 6.6.: Optimale Dämmstärken für das Gewerbequartier für den kombinierten Heiz- und Kühlfall in Abhängigkeit der Gebäudetechnikvariante sowie den Modellierungsansätzen für den Stromsektor als Violinplots mit integriertem Boxplot für Optimierungen mit typischen Perioden

betrachteten Gewerbequartier. Analog zur Einfamilienhaussiedlung sind die Ergebnisse für vier Varianten mit dezentraler Versorgung auf Gebäudeebene (L-W-WP, L-W-WP+PV, L-W-WP+PV+Sp., S-W-WP+PV+Sp.) sowie für eine zentrale Quartierslösung dargestellt.

Auch auf Quartiersebene zeigt sich ein klarer Einfluss der Dekarbonisierung. In allen betrachteten Gebäudetypen halbiert sich die mittlere Dämmstärke ungefähr, wenn statt konstanter Stromsektordaten (K-Fälle) dekarbonisierte Szenarien (D-Fälle) zugrunde gelegt werden. So liegen die mittleren Dämmstärken im Büroquartier bei durchschnittlich 0,49 m in den K-Fällen und sinken in den D-Fällen auf rund 0,34 m. Die Universität weist die höchsten Werte aller Quartiere auf, mit durchschnittlich 0,49 m (K-Fälle) und knapp 0,39 m (D-Fälle). In den Schulquartieren ergeben sich mittlere Dämmstärken von 0,36 m (K-Fälle) und etwa 0,20 m (D-Fälle). Deutlich niedriger liegen die Werte im Gewerbehallenkontext. Hier beträgt die Dämmstärke im Mittel 0,06 m (K-Fälle) und sinkt in den D-Fällen auf nur noch 0,01 m bis 0,02 m.

Damit wird sichtbar, dass die zentrale Quartiersversorgung die Ergebnisse der dezentralen Varianten gut widerspiegelt, die Unterschiede aber je nach Gebäudetyp variieren. Während die Differenzen zwischen K- und D-Fällen im Büro-, Schul- und Universitätsgebäuden sehr deutlich ausfallen, sind sie in der Gewerbehalle vergleichsweise gering. Insgesamt zeigt sich jedoch konsistent: Dekarbonisierte Stromsektordaten führen systematisch zu deutlich geringeren Dämmstärken, auch im Quartiersmaßstab.

Die Berücksichtigung von stündlich aufgelöster Stromsektordaten führt – wie bereits bei den Einfamilienhaussiedlungen – zu keinen nennenswerten Abweichungen gegenüber den konstanten Jahreswerten. Die Dekarbonisierung reduziert die optimale Dämmstärke in allen Gebäudetypen deutlich und bestätigt somit die Haupthypothese H1 und Zusatzhypothese Z2.

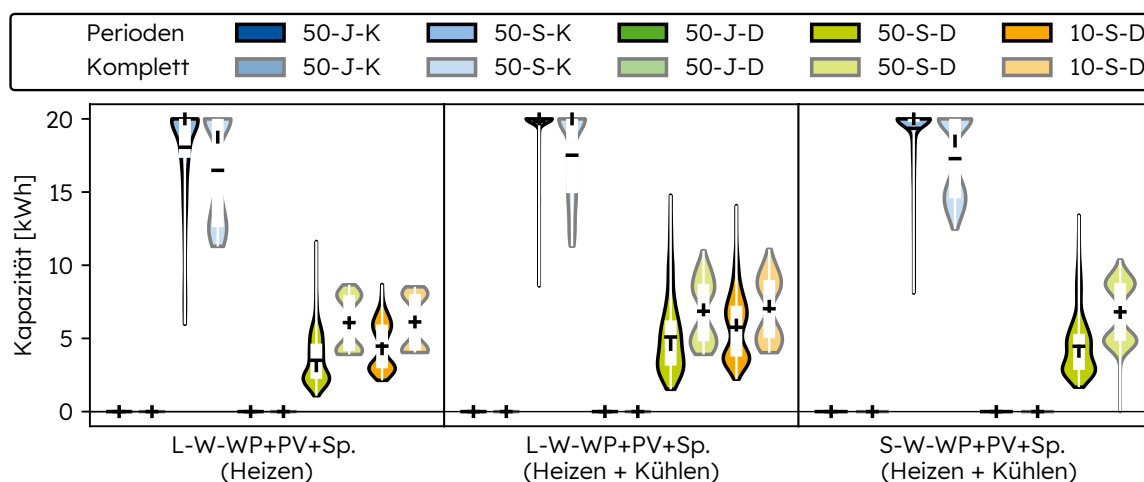
## **6.2. Einfluss der Stromsektordaten in stündlicher Auflösung auf Speichersysteme**

Die Haupthypothese H2 geht davon aus, dass für eine realistische Dimensionierung thermischer und elektrischer Speicher Stromsektordaten in stündlicher Auflösung erforderlich sind. Im nachfolgenden Abschnitt werden die Unterschiede zwischen Jahresmittelwerten und stündlich aufgelösten Daten dargestellt und ihre Relevanz für die Speichergröße analysiert (vgl. Kapitel 4.1).

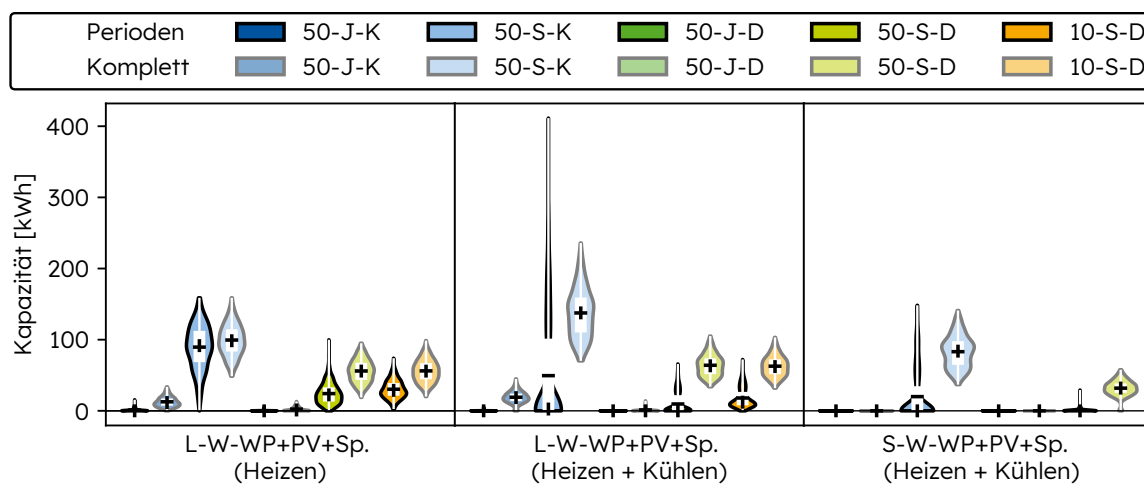
Abbildung 6.7 zeigt die optimierten Speicherkapazitäten des Einfamilienhauses mit Teil (a) für elektrische Speicher und Teil (b) für Warmwasserspeicher. Berücksichtigt werden nur die Varianten, in denen Speicher relevant sind (L-W-WP+PV+Sp. sowie die Variante mit Sole-Wasser-Wärmepumpe).

Der zentrale Befund ist der klare Unterschied zwischen den J-Szenarien (Jahresmittelwerte) und den S-Szenarien (stündlich aufgelöste Daten).

Für die elektrischen Speicher ergeben sich in den J-Szenarien praktisch keine Kapazitäten (0 kWh). In den S-Szenarien dagegen steigt die mittlere Dimensionierung auf etwa 17–20 kWh (50-S-K) und liegt auch in den Dekarbonisierungsvarianten noch bei 5–7 kWh (50-S-D, 10-S-D). Damit bestätigt sich, dass nur die stündliche Auflösung die zeitliche Variabilität der Emissionen erfasst und einen



(a) Elektrischer Speicher



(b) Warmwasserspeicher

Abbildung 6.7.: Optimale Speichergrößen für das Einfamilienhaus in Abhängigkeit von Betriebsfall (nur Heizen bzw. Heizen + Kühlen), Gebäude-technikvariante sowie den Modellierungsansätzen für den Stromsektor als Violinplots mit integriertem Boxplot für Optimierungen über ein volles Jahr sowie über typische Perioden

Speicherbedarf sichtbar macht.

Bei den Warmwasserspeichern zeigen sich ähnliche Muster. In den J-Szenarien sind die Kapazitäten sehr klein (zumeist  $< 20 \text{ kWh}$ ), während in den S-Szenarien deutlich höhere Werte erreicht werden. So liegen die mittleren Größen für die Va-

riante L-W-WP+PV+Sp. im Bereich von 50 –140 kW h (50-S-K), in Einzelfällen auch darüber. Für die Sole-Wasser-Wärmepumpe (S-W-WP+PV+Sp.) liegen die Kapazitäten niedriger, mit typischen Werten um 80 kW h. Auch hier gilt, dass nur die stündliche Auflösung die Flexibilitätspotenziale thermischer Speicher realistisch nutzt.

Zwischen K- und D-Szenarien (mit bzw. ohne Dekarbonisierung) bestehen zwar Unterschiede, diese sind jedoch deutlich geringer als die Diskrepanz zwischen J- und S-Szenarien. Beispielsweise liegen die Warmwasserspeicher im Mittel beim 50-S-K-Szenario bei knapp 100 kW h, während die 50-S-D-Variante noch immer bei etwa 55 kW h liegt.

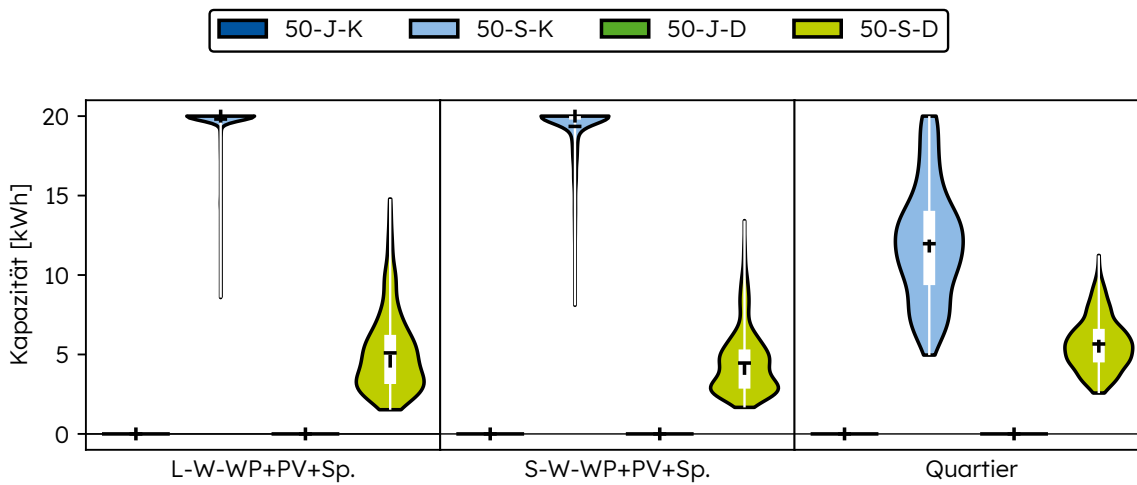
Damit lässt sich die Haupthypothese H2 klar bestätigen. Nur Stromsektordaten mit stündlicher Auflösung erlauben eine realistische Dimensionierung von elektrischen und thermischen Speichern. Jahresmittelwerte hingegen unterschätzen den Speicherbedarf systematisch und führen zu praktisch irrelevanten Speichergrößen.

Die detaillierten Abbildungen für Büro, Schule und Gewerbehalle (Abb. B.1 bis B.3) sowie die quantitativen Ergebnisse bestätigen dieses Bild. Somit kann die Zusatzhypothese Z1 auch für Haupthypothese H2 bestätigt werden.

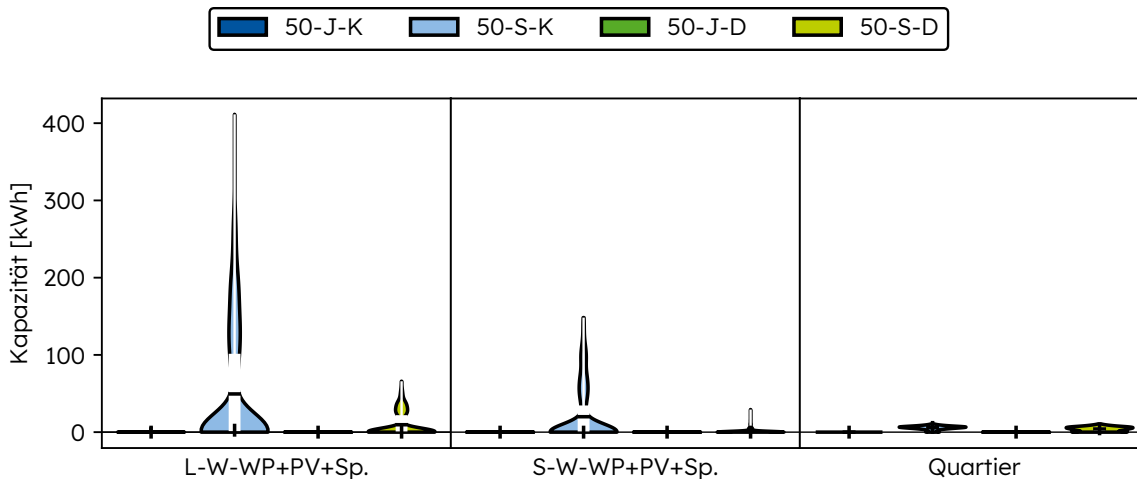
Abbildung 6.8 zeigt die Ergebnisse für die optimierten Speichergrößen bei der betrachteten Einfamilienhaussiedlung. Dargestellt sind zwei Varianten eine mit dezentraler Versorgung (L-W-WP+PV+Sp. sowie S-W-WP+PV+Sp.) und eine mit zentraler Quartiersversorgung über ein 5GDHC.

Wie bereits beim Einfamilienhaus zeigt sich auch in der Einfamilienhaussiedlung ein deutlicher Unterschied zwischen den J-Szenarien (Jahresmittelwerte) und den S-Szenarien (stündliche Auflösung).

Für die elektrischen Speicher ergeben sich in den J-Szenarien durchweg vernachlässigbare Größenordnungen von 0 kW h. In den S-Szenarien hingegen steigt die Speicherkapazität deutlich an. So werden bei der Variante L-W-WP+PV+Sp. im Mittel rund 20 kW h (50-S-K) erreicht, während in den Dekarbonisierungsvarianten noch etwa 5 kW h (50-S-D) verbleiben. Die Variante mit S-W-WP+PV+Sp. zeigt ein sehr ähnliches Verhalten (19 kW h im 50-S-K-Szenario und 4,5 kW h im 50-S-



(a) Elektrischer Speicher



(b) Warmwasserspeicher

Abbildung 6.8.: Optimale Speichergrößen für die Einfamilienhaussiedlung für den kombinierten Heiz- und Kühlfall in Abhängigkeit der Gebäudetechnikvariante sowie den Modellierungsansätzen für den Stromsektor als Violinplots mit integriertem Boxplot für Optimierungen mittels typischer Perioden

D-Szenario). Im Quartiersfall fallen die mittleren Speicherwerte etwas geringer aus, mit etwa 12 kWh (50-S-K) und 6 kWh (50-S-D), da durch die Aggregation der Lastprofile die Gleichzeitigkeit sinkt und weniger Spitzen auszugleichen sind.

Auch bei den Wärmespeichern zeigt sich das gleiche Muster. In den J-Szenarien

ergeben sich praktisch keine Kapazitäten (0 bis max. 0,04 kWh). In den S-Szenarien werden dagegen deutlich größere Speicher optimiert. Bei der Variante L-W-WP+PV+Sp. werden im 50-S-K-Szenario im Durchschnitt knapp 50 kWh erreicht, während in der Dekarbonisierungsvariante (50-S-D) noch rund 10 kWh verbleiben. Für die Sole-Wasser-Wärmepumpe (S-W-WP+PV+Sp.) liegen die mittleren Speichergrößen deutlich niedriger (20 kWh im 50-S-K-Szenario, nur 1 kWh im 50-S-D-Szenario). Im Quartiersfall ergeben sich dagegen lediglich sehr kleine Wärmespeicher im Durchschnitt von etwa 4–6 kWh.

Zusammenfassend bestätigt sich damit erneut, dass nur Stromsektordaten mit stündlicher Auflösung eine realistische Dimensionierung von elektrischen und thermischen Speichern ermöglichen. Jahresmittelwerte unterschätzen den Speicherbedarf systematisch und führen zu praktisch irrelevanten Speichergrößen.

Damit bestätigt sich die Haupthypothese H2 auch für die Einfamilienhaussiedlung. Stromsektordaten mit stündlicher Auflösung sind eine zwingende Voraussetzung für eine belastbare Dimensionierung elektrischer und thermischer Speicher.

Abbildung 6.9 zeigt die Ergebnisse zum Gewerbequartier für die elektrischen Speicher. Wie bereits bei der Einfamilienhaussiedlung bestätigt sich auch hier: Nur die Szenarien mit stündlich aufgelösten Stromsektordaten (S-Fälle) führen zu signifikanten Speicherkapazitäten, während die Jahresmittel-Szenarien (J-Fälle) praktisch keinen Bedarf erkennen lassen.

Die Quartiersergebnisse fallen jedoch deutlich größer aus als bei Einzelgebäuden. Für Büroquartiere liegen die mittleren elektrischen Speichergrößen im 50-S-K-Szenario bei rund 77 kWh, während sie in den Dekarbonisierungsfällen (50-S-D) noch etwa 23 kWh erreichen. In Gewerbehallen steigt die mittlere Dimensionierung auf rund 204 kWh (50-S-K) und bleibt selbst bei Dekarbonisierung mit 54 kWh signifikant. Besonders hoch sind die Speicherbedarfe in Schulen. Hier werden im S-K-Szenario Mittelwerte über 620 kWh erreicht, während im S-D-Szenario noch 223 kWh erforderlich sind. Die größten Mittelwerte zeigen sich bei der Universität, das im 50-S-K-Szenario mittlere Speichergrößen von knapp 1194 kWh benötigt; selbst bei Dekarbonisierung verbleiben noch fast 295 kWh.

Damit wird deutlich, dass insbesondere in Quartierssystemen die Wahl der

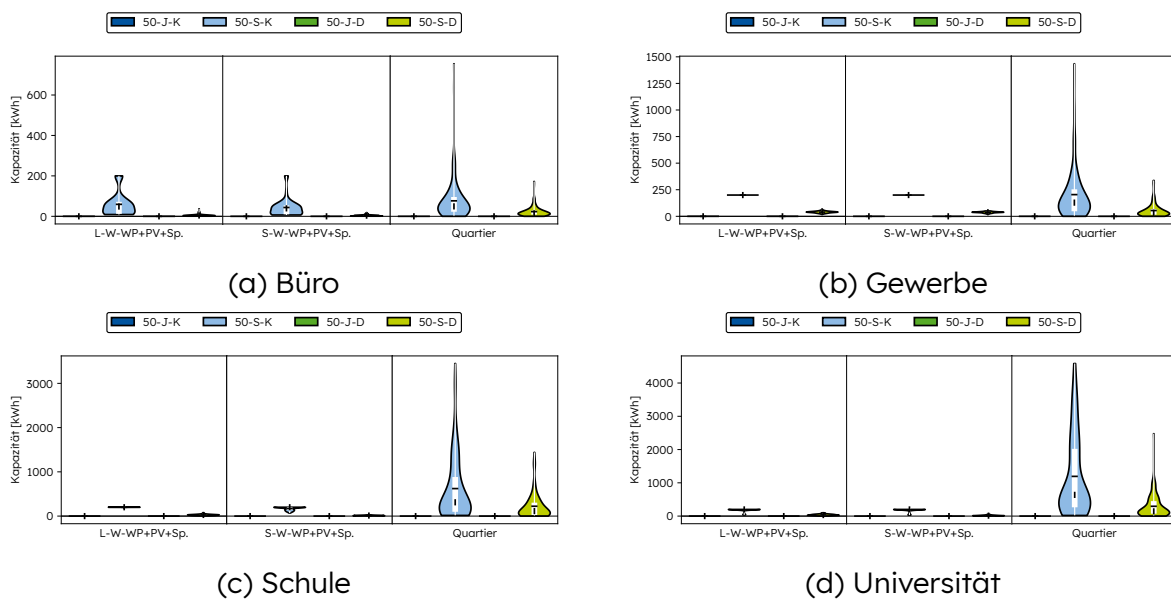


Abbildung 6.9.: Optimale Speichergrößen der elektrischer Speicher des Gewerbequartiers für den kombinierten Heiz- und Kühlfall in Abhängigkeit der Gebäudetechnikvariante sowie den Modellierungsansätzen für den Stromsektor als Violinplots mit integriertem Boxplot für Optimierungen mittels typischer Perioden

Stromsektordaten entscheidend ist. Nur eine stündliche Auflösung macht die hohen Speicherbedarfe sichtbar, während die Nutzung von Jahresmittelwerten zu systematisch unterschätzten und damit unrealistischen Dimensionierungen führt.

Damit bestätigt sich die Haupthypothese H2 auch für das Gewerbequartier und somit wird auch Zusatzhypothese Z2 bestätigt.

### 6.3. Einfluss von marginale Stromemissionswerten auf die Dämmstärke

Mit der Haupthypothese H3 wird angenommen, dass die Berücksichtigung marginaler Stromsektordaten einen signifikanten Einfluss auf die optimale Dämmstärke von Gebäuden hat. Die folgenden Ergebnisse vergleichen daher durchschnittliche und marginale Emissionswerte und zeigen deren Konsequenzen für die Bewertung von Dämmstärken (vgl. Kapitel 4.2.1).

Abbildung 6.10 zeigt den Einfluss marginaler Stromsektoremissionen auf die optimale zusätzliche Dämmstärke des Einfamilienhauses. Der Aufbau entspricht den vorherigen Abbildungen, jedoch werden hier Ergebnisse mit durchschnittlichen Emissionswerten (gesättigte Farben) denjenigen mit marginalen Emissionswerten (ungesättigte Farben) gegenübergestellt.

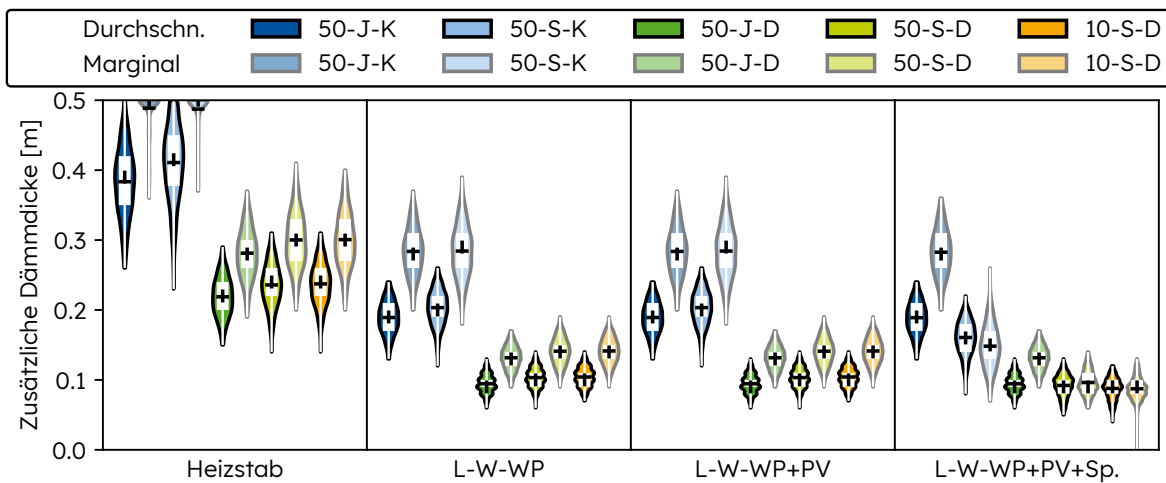
Die Ergebnisse zeigen, dass die optimale Dämmstärke bei Verwendung marginaler Emissionen in allen untersuchten Szenarien deutlich höher ausfällt. Besonders stark ist der Effekt im Heizstab-Szenario. Während im Standardfall die mittlere Dämmstärke zwischen 0,38 m und 0,41 m liegt, steigt sie bei marginaler Betrachtung auf Werte zwischen 0,49 m und 0,50 m. Dies entspricht einer Zunahme um rund 0,1 m bzw. 25 %.

Auch in den Wärmepumpen-Szenarien ohne PV zeigt sich ein systematischer Anstieg. Die mittlere Dämmstärke erhöht sich von etwa 0,19 m auf rund 0,28 m, was einem relativen Unterschied von ca. 45 % entspricht. Mit zusätzlicher PV (L-W-WP+PV) ergibt sich ein sehr ähnliches Bild, während die Unterschiede bei der Kombination mit Speichern deutlich geringer ausfallen. Hier beträgt die mittlere Reduktion des Effekts rund 0,05 m, sodass die Unterschiede im Bereich von weniger als 10 % bleiben.

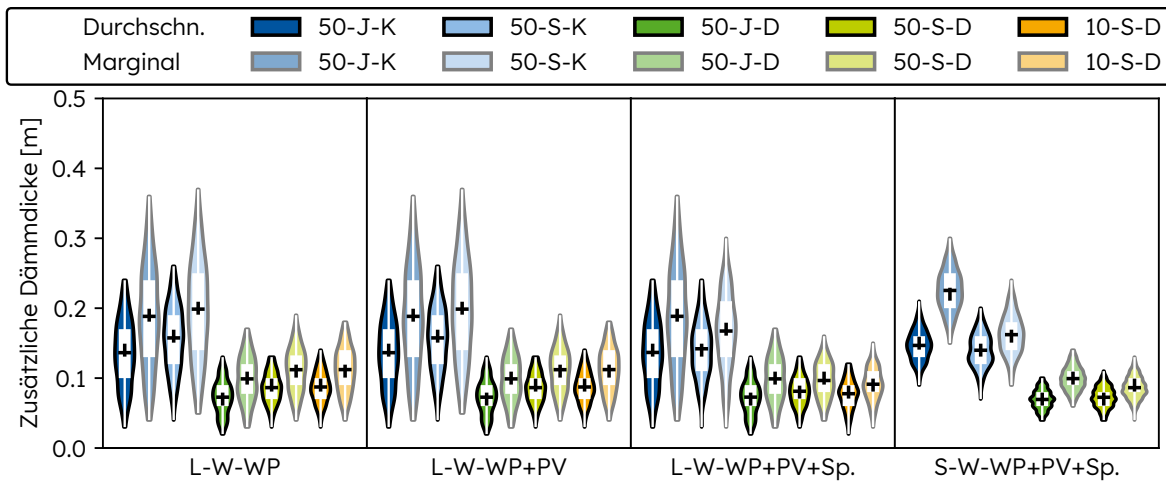
Im kombinierten Heiz- und Kühlfall verstärkt sich dieser Trend. Bei Luft-Wasser-Wärmepumpen ohne PV steigt die mittlere optimale Dämmstärke von ca. 0,14 m auf ca. 0,19 m, also um 36 %. Mit PV sind die Werte nahezu identisch. Am größten ist der Effekt bei Systemen mit Sole-Wasser-Wärmepumpe und PV+Speicher. Hier erhöht sich die Dämmstärke von durchschnittlich 0,15 m auf bis zu 0,23 m, was einem Anstieg um mehr als 50 % entspricht.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass marginale Emissionswerte die optimale Dämmstärke in allen Szenarien erhöhen, typischerweise um 25–50 % im Vergleich zu den durchschnittlichen Emissionswerten. Der Effekt ist besonders stark in Szenarien ohne Speicher, da kurzfristige Emissionsspitzen direkt auf die Bewertung durchschlagen. Speicher können diese Schwankungen jedoch teilweise abfedern, sodass die Unterschiede hier kleiner ausfallen (unter 10 %).

Damit bestätigt sich die Haupthypothese H3, dass marginale Emissionswerte einen erheblichen Einfluss auf die Bewertung von Dämmmaßnahmen haben. Ein-



(a) Heizen



(b) Heizen + Kühlen

Abbildung 6.10.: Optimale Dämmstärken für das Einfamilienhaus in Abhängigkeit von Betriebsfall (nur Heizen bzw. Heizen + Kühlen), Gebäudetechnikvariante sowie den Modellierungsansätzen für den Stromsektor als Violinplots mit integriertem Boxplot für Optimierungen mit marginalen sowie durchschnittlichen Stromsektoremissionswerten

schränkungen gelten lediglich für Systeme mit Speichern, bei denen der Effekt deutlich abgeschwächt wird. Die weiteren Ergebnisabbildungen für Schule, Büro und Industriegebäude (vgl. Abb. B.4 bis B.6) zeigen das gleiche Muster, so dass hier keine gesonderte Diskussion erfolgt. Die Zusatzhypothese Z1, dass die

Haupthypothese H3 auch für andere Gebäudetypen gültig ist, kann damit bestätigt werden.

## 6.4. Einfluss von Wetterdaten, welche den Klimawandel berücksichtigen

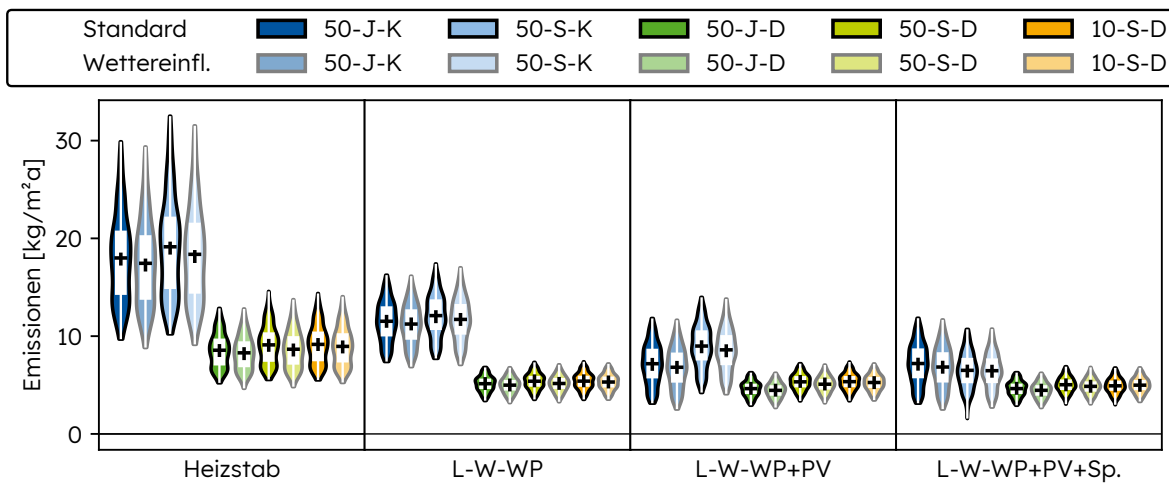
Die Haupthypothese H4 besagt, dass der Einfluss klimawandelangepasster Wetterdaten auf Emissionen und Dämmstärken im Vergleich zum Effekt der Stromsektordekarbonisierung vernachlässigbar ist. Im Folgenden wird der Einfluss des RCP-4.5-Szenarios untersucht und den Ergebnissen mit aktuellen Wetterdaten gegenübergestellt (vgl. Kapitel 4.2.2).

Abbildung 6.11 zeigt die Ergebnisse des Einflusses von Wettervariabilität auf die spezifischen jährlichen Emissionen des Einfamilienhauses. Dargestellt sind sowohl die Standardfälle ohne Wetterveränderungen (gesättigte Farben) als auch die Varianten mit Wettereinfluss (ungesättigte Farben), welche mehrere Wetterdatensätze auf Basis des RCP-4.5-Szenarios berücksichtigen.

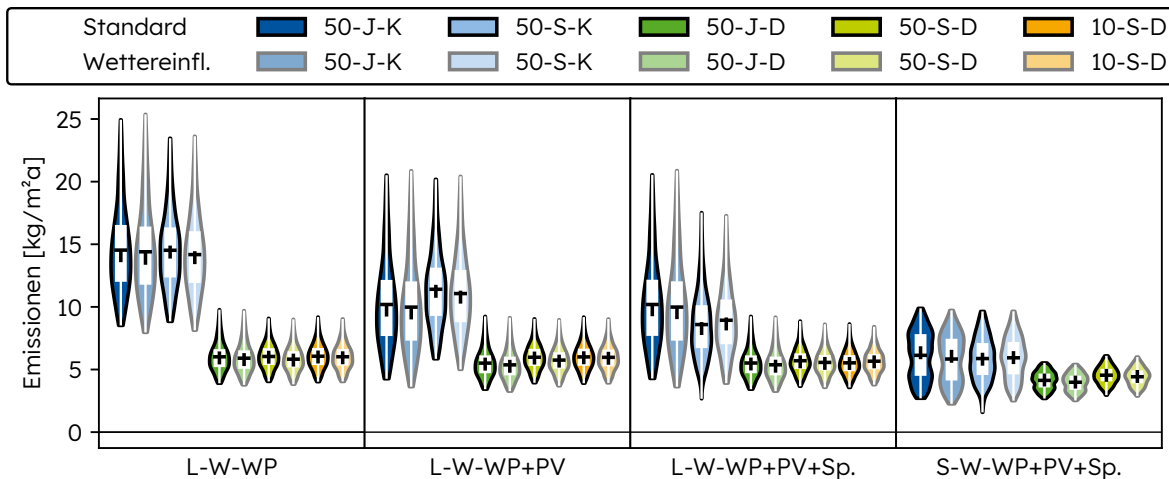
Die Unterschiede zwischen beiden Fällen sind insgesamt sehr gering und liegen systematisch im Bereich von wenigen Prozent. Im Heizstab-Szenario beträgt die mittlere Emissionsreduktion durch Wettereinfluss etwa  $0,5 \text{ kg}_{\text{CO}_2\text{-eq}}/(\text{m}^2 \text{ a})$ , was rund 3 % entspricht (von ca.  $18,0 \text{ kg}_{\text{CO}_2\text{-eq}}/(\text{m}^2 \text{ a})$  im Standardfall auf  $17,5 \text{ kg}_{\text{CO}_2\text{-eq}}/(\text{m}^2 \text{ a})$  mit Wettereinfluss). Bei den Luft-Wasser-Wärmepumpen ohne PV sinken die Emissionen im Mittel von  $11,5 \text{ kg}_{\text{CO}_2\text{-eq}}/(\text{m}^2 \text{ a})$  auf etwa  $11,2 \text{ kg}_{\text{CO}_2\text{-eq}}/(\text{m}^2 \text{ a})$ , also um rund 2,5 %.

Mit zusätzlicher PV (L-W-WP+PV) ist der Effekt nochmals geringer. Die Emissionen verringern sich von durchschnittlich  $7,2 \text{ kg}_{\text{CO}_2\text{-eq}}/(\text{m}^2 \text{ a})$  auf  $6,8 \text{ kg}_{\text{CO}_2\text{-eq}}/(\text{m}^2 \text{ a})$ , entsprechend ca. 5 %. Auch bei den Speicher-Varianten (L-W-WP+PV+Sp.) beträgt der Rückgang typischerweise nur  $0,3 \text{ kg}_{\text{CO}_2\text{-eq}}/(\text{m}^2 \text{ a})$ , also weniger als 5 %.

Im kombinierten Heiz- und Kühlfall sind die Unterschiede noch geringer. Bei den Wärmepumpen (L-W-WP) reduzieren sich die Emissionen von durchschnittlich  $14,5 \text{ kg}_{\text{CO}_2\text{-eq}}/(\text{m}^2 \text{ a})$  auf  $14,4 \text{ kg}_{\text{CO}_2\text{-eq}}/(\text{m}^2 \text{ a})$ , also um weniger als 1 %. Auch bei den Varianten mit PV und Speicher beträgt die Differenz meist nur  $0,2 - 0,3 \text{ kg}_{\text{CO}_2\text{-eq}}/(\text{m}^2 \text{ a})$ , was relativen Änderungen von 2 % bis maximal 2,5 % ent-



(a) Heizen



(b) Heizen + Kühlen

Abbildung 6.11.: Optimale Emissionswerte für das Einfamilienhaus in Abhängigkeit von Betriebsfall (nur Heizen bzw. Heizen + Kühlen), Gebäudetechnikvariante sowie den Modellierungsansätzen für den Stromsektor als Violinplots mit integriertem Boxplot für Optimierungen mit klimawandelangepassten Wetterdaten sowie nicht angepassten Wetterdaten (Wettereinfl. = Wettereinfluss)

spricht.

Zusammenfassend ergibt sich damit, dass die Wettervariabilität zwar messbare Unterschiede erzeugt, diese aber stets im niedrigen Prozentbereich bleiben und maximal etwa  $0,5 \text{ kg CO}_2\text{-eq}/(\text{m}^2 \text{ a})$  betragen. Im Vergleich zur Dekarbonisierung

des Stromsektors, die Unterschiede von bis zu  $12 \text{ kg}_{\text{CO}_2\text{-eq}}/(\text{m}^2 \text{ a})$  bewirkt, ist der Einfluss damit klar nachrangig. Die Haupthypothese H4, dass Wettervariabilität für die Bewertung von Emissionen vernachlässigbar ist, wird somit bestätigt.

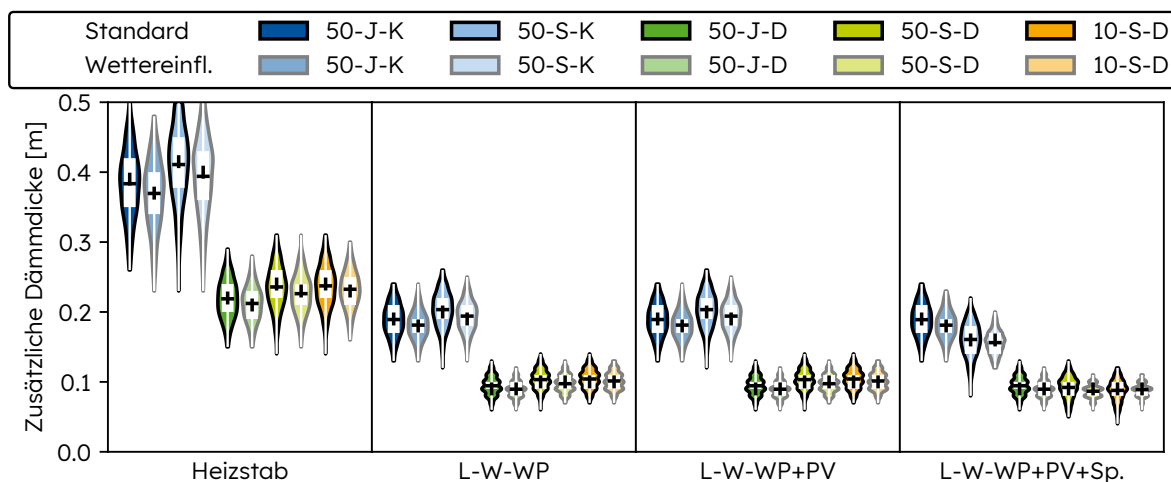
Abbildung 6.12 zeigt die Ergebnisse des Einflusses der Wettervariabilität auf die optimale zusätzliche Dämmstärke. Dargestellt sind sowohl die Standardfälle (gesättigte Farben) als auch die Varianten mit explizitem Wettereinfluss (ungesättigte Farben). Die Violinplots sind analog zu den bisherigen Abbildungen aufgebaut und beinhalten die Mittelwerte (weiße Marker) sowie die Streuung der Ergebnisse.

Es zeigt sich, dass die Unterschiede zwischen den beiden Fällen sehr gering bleiben. Im Heizstab-Szenario liegt die mittlere Dämmstärke im Standardfall bei rund 0,38 m, während sie mit Wettereinfluss auf etwa 0,37 m sinkt. Das ist ein Rückgang von 0,01 m (ca. 3%). Auch bei den Wärmepumpen ohne PV (L-W-WP) beträgt die Reduktion nur etwa 0,01 m (5%). Mit zusätzlicher PV (L-W-WP+PV) zeigt sich derselbe Effekt. Die Dämmstärke verringert sich von durchschnittlich 0,19 m auf 0,18 m.

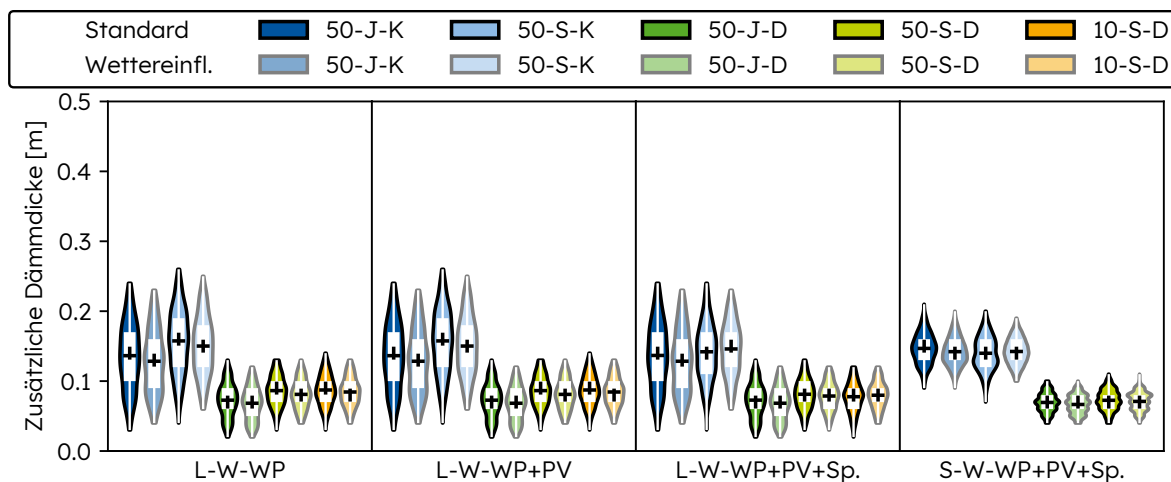
Bei den Szenarien mit Speichern (L-W-WP+PV+Sp. sowie S-W-WP+PV+Sp.) sind die Unterschiede nochmals geringer. Hier beträgt die Abweichung typischerweise weniger als 0,005 m, was relativen Veränderungen von unter 3% entspricht.

Für den kombinierten Heiz- und Kühlfall ergibt sich ein sehr ähnliches Bild. Bei den Wärmepumpenvarianten sinkt die mittlere Dämmstärke von etwa 0,136 m im Standardfall auf rund 0,128 m mit Wettereinfluss. Dies entspricht einer Reduktion von ca. 0,008 m bzw. 4%. Auch hier bleiben die Unterschiede in den Speicher-Szenarien mit unter 0,005 m minimal.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Wettervariabilität die optimale Dämmstärke zwar messbar beeinflusst, die Änderungen aber stets im Bereich weniger Millimeter und unter 5% liegen. Damit bleibt der Effekt im Vergleich zur Stromsektordekarbonisierung (Unterschiede von bis zu 0,15 m bzw. 30%) von nachrangiger Bedeutung. Die Haupthypothese H4, dass Wettervariabilität im Kontext der untersuchten Fragestellung vernachlässigbar ist, wird somit bestätigt.



(a) Heizen



(b) Heizen + Kühlen

Abbildung 6.12.: Optimale Dämmstärken für das Einfamilienhaus in Abhängigkeit von Betriebsfall (nur Heizen bzw. Heizen + Kühlen), Gebäudetechnikvariante sowie den Modellierungsansätzen für den Stromsektor als Violinplots mit integriertem Boxplot für Optimierungen mit klimawandelangepassten Wetterdaten sowie nicht angepassten Wetterdaten (Wettereinfl. = Wettereinfluss)

Zusätzliche Ergebnisse für Schulen, Bürogebäude und Industriegebäude finden sich im Anhang (Abb. B.7 bis B.12). Diese bestätigen die für das Einfamilienhaus abgeleiteten Erkenntnisse, sodass an dieser Stelle auf eine ausführliche Darstellung verzichtet wird. Damit lässt sich auch Zusatzhypothese Z1 bestätigen, die

besagt, dass diese Haupthypothese unabhängig vom Gebäudetyp gilt.

## **6.5. Einfluss der Degradation der Gebäudetechnik und Dämmung**

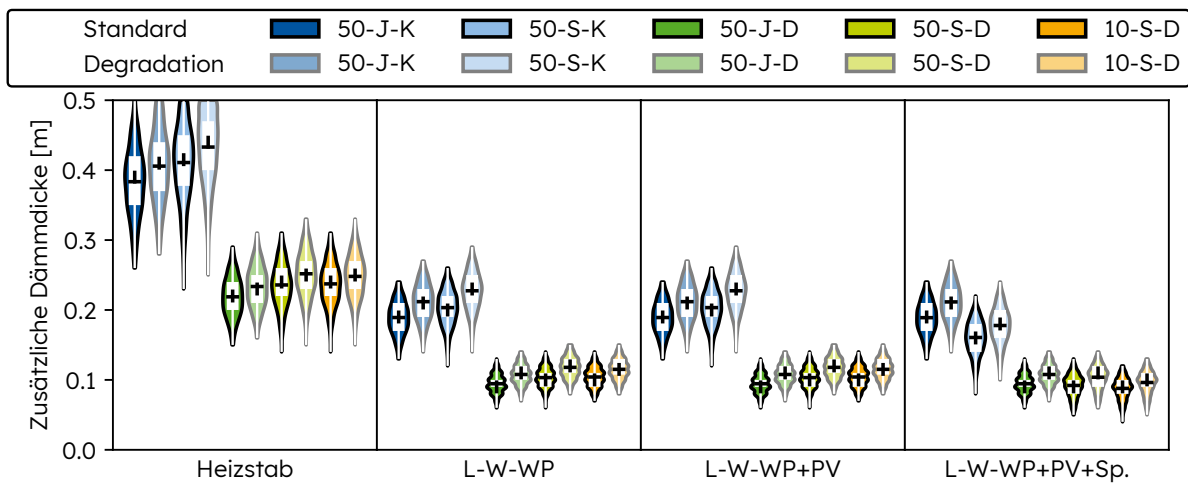
Die Haupthypothese H5 geht davon aus, dass die Degradation von Gebäudetechnik und Dämmung über die Lebensdauer des Gebäudes einen signifikanten Einfluss auf die optimale Dämmstärke ausübt. Im Folgenden werden die Unterschiede zwischen Szenarien mit und ohne Degradationsannahmen dargestellt (vgl. Kapitel 4.2.3).

Abbildung 6.13 zeigt die Ergebnisse des Degradationseinflusses auf die optimale zusätzliche Dämmstärke des Einfamilienhauses. Die Darstellung folgt dem bereits bekannten Schema. In gesättigten Farben ist der Standardfall ohne Degradation dargestellt, in ungesättigten Farben die Varianten mit Berücksichtigung der Degradation von Gebäudetechnik und Dämmung.

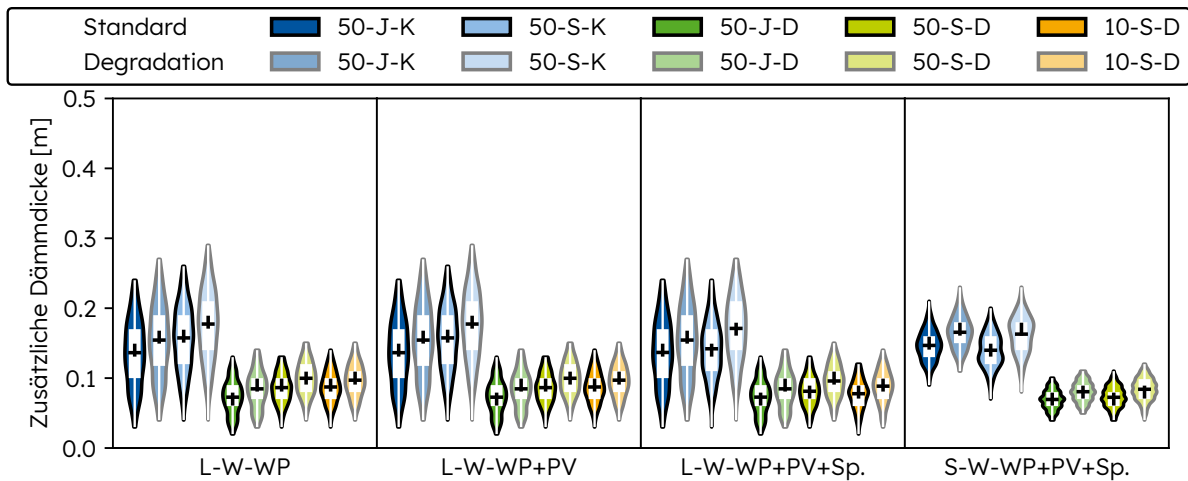
Es zeigt sich, dass der Einfluss der Degradation zwar insgesamt gering ist, jedoch systematisch zu einer Erhöhung der optimalen Dämmstärke führt. Im Heizstab-Szenario steigt die Dämmstärke im Mittel von rund 0,38 m auf etwa 0,41 m, was einer Zunahme von 0,02 m bis 0,03 m bzw. 6 %–7 % entspricht. Bei den Wärmepumpenvarianten ohne PV (L-W-WP) fällt der Effekt ähnlich aus. Hier erhöht sich die Dämmstärke von durchschnittlich 0,19 m auf etwa 0,21 m, also um 0,02 m bzw. knapp 10 %. Auch bei den Varianten mit PV (L-W-WP+PV) zeigt sich derselbe Effekt.

In den Szenarien mit Speichern (L-W-WP+PV+Sp. sowie S-W-WP+PV+Sp.) ist der Einfluss deutlich geringer. Die Dämmstärke steigt hier nur um rund 0,01 m, was einer relativen Zunahme von 3 %–5 % entspricht. Besonders im Fall 50-S-K mit Speicher liegt die Differenz zu vernachlässigen Bereich.

Für die kombinierten Heiz- und Kühlszenarien ist ein ähnliches Bild erkennbar. Bei den Wärmepumpenvarianten erhöht sich die Dämmstärke durch die Berücksichtigung von Degradation typischerweise um 0,015 m bis 0,02 m, was etwa 10 % entspricht. Auch hier zeigt sich, dass die Effekte bei Systemen mit Speichern geringer ausfallen und im Bereich von 3 %–5 % liegen.



(a) Heizen



(b) Heizen + Kühlen

Abbildung 6.13.: Optimale Dämmstärken für das Einfamilienhaus in Abhängigkeit von Betriebsfall (nur Heizen bzw. Heizen + Kühlen), Gebäudetechnikvariante sowie den Modellierungsansätzen für den Stromsektor als Violinplots mit integriertem Boxplot für Optimierungen mit Degradation der Gebäudetechnik und Dämmung sowie ohne Degradation

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Berücksichtigung von Degradation die optimale Dämmstärke zwar systematisch erhöht, der Effekt jedoch in allen Szenarien im Bereich weniger Zentimeter bleibt und damit deutlich kleiner ausfällt als der Einfluss der Dekarbonisierung des Stromsektors, die Unterschie-

de von bis zu 0,15 m (30 %) verursacht. Damit bestätigt sich die Haupthypothese H5, die besagt, dass die Degradation der Gebäudetechnik und Dämmung über die Lebensdauer des Gebäudes keinen signifikanten Einfluss auf die Auswahl der Dämmstärke hat. Der Einfluss der Degradation ist zwar vorhanden, im Vergleich zur Stromsektordekarbonisierung jedoch von untergeordneter Bedeutung und in vielen Fällen vernachlässigbar.

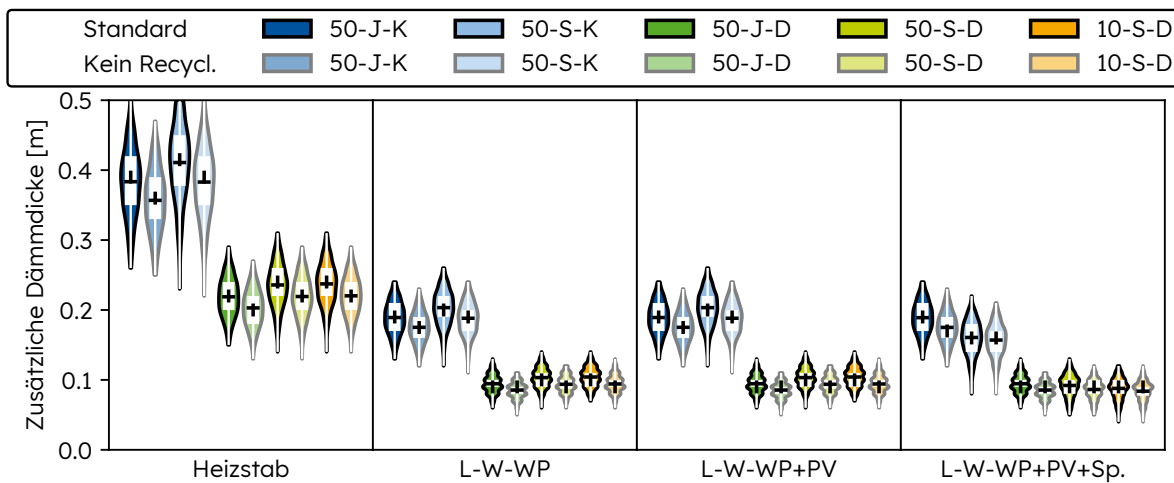
Die weiteren Ergebnisabbildungen sind im Anhang unter Abb. B.13 bis B.15 dargestellt. Sie zeigen für Schulen, Büro- und Industriegebäude ein sehr ähnliches Bild wie beim Einfamilienhaus, sodass sich die gleichen Schlussfolgerungen ziehen lassen. Eine detaillierte Diskussion ist daher nicht erforderlich. Damit wird auch die Zusatzhypothese Z1 für die Haupthypothese H5 bestätigt und zwar das der Einfluss der Degradation für alle Gebäudetypen im Vergleich zur Dekarbonisierung des Stromsektors von untergeordneter Bedeutung ist.

## **6.6. Einfluss der Berücksichtigung des Recyclingpotentials auf die Dämmstärke und Emissionen**

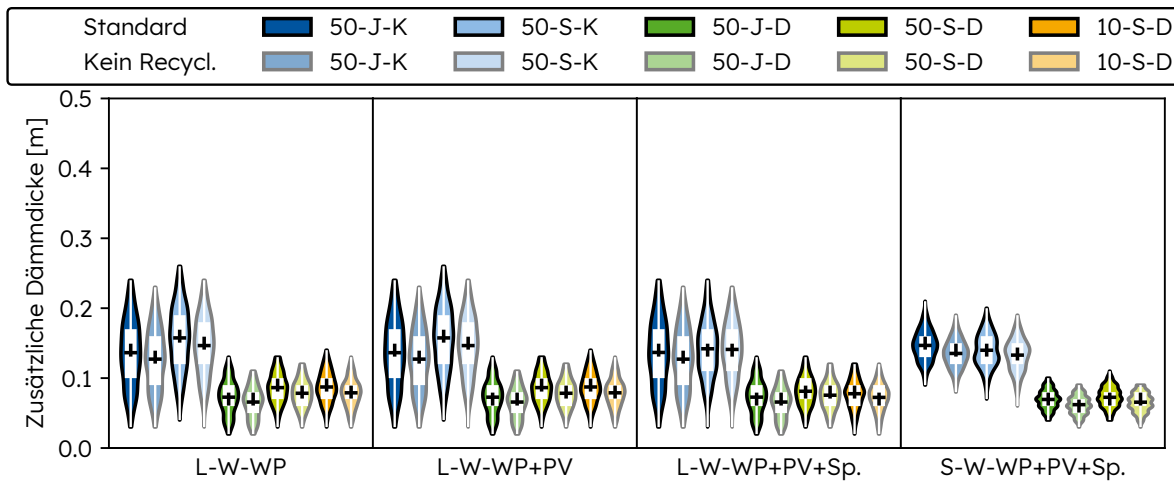
Die sechste Haupthypothese H6 postuliert, dass die Berücksichtigung des Recyclingpotentials im Vergleich zur Dekarbonisierung des Stromsektors nur einen geringen Einfluss auf die Bewertung von Gebäudetechnik, Dämmstärke und Emissionen hat. Der folgende Abschnitt untersucht diesen Zusammenhang anhand von Szenarien mit und ohne Phase D (vgl. Kapitel 4.2.4).

Abbildung 6.14 zeigt den Einfluss des Recyclingpotentials auf die zusätzliche Dämmstärke des Einfamilienhauses. Dargestellt sind sowohl die Ergebnisse für den Standardfall mit Berücksichtigung des Recyclingpotentials (gesättigte Farben) als auch für den Fall ohne Berücksichtigung des Recyclingpotentials (ungesättigte Farben). Die Violinplots sind analog zu den vorherigen Abbildungen aufgebaut und beinhalten die Mittelwerte (weiße Marker) sowie die Streuung der Ergebnisse.

Es zeigt sich, dass der Wegfall des Recyclingpotentials die optimale Dämmstärke in fast allen betrachteten Szenarien reduziert. Am deutlichsten ist dieser Effekt



(a) Heizen



(b) Heizen + Kühlen

Abbildung 6.14.: Optimale Dämmstärken für das Einfamilienhaus in Abhängigkeit von Betriebsfall (nur Heizen bzw. Heizen + Kühlen), Gebäudetechnikvariante sowie den Modellierungsansätzen für den Stromsektor als Violinplots mit integriertem Boxplot für Optimierungen mit und ohne Einfluss des Recyclingpotentials

im Heizstab-Szenario. Hier sinkt die mittlere Dämmstärke von rund 0,38 m bis 0,41 m im Standardfall auf etwa 0,35 m bis 0,38 m ohne Recyclingpotential, was einer Reduktion um ca. 0,05 m bzw. 10 % entspricht.

Bei den Wärmepumpenvarianten (L-W-WP und L-W-WP+PV) fällt der Effekt

schwächer aus. Die mittlere Dämmstärken liegen im Standardfall im Bereich von 0,19 m bis 0,20 m, während sie ohne Recyclingpotential um rund 0,02 m bis 0,03 m niedriger sind. Dies entspricht einer relativen Verringerung von 7 % bis 9 %. Besonders im Heizbetrieb ohne PV sinkt die mittlere Dämmstärke von etwa 0,30 m im Standardfall auf ungefähr 0,27 m im Fall ohne Recycling.

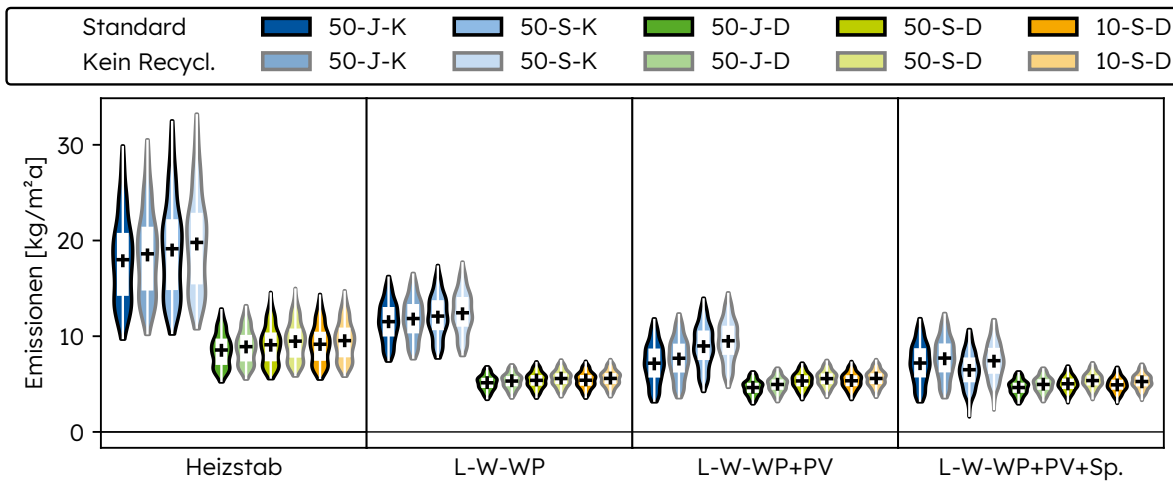
Die Unterschiede fallen in Szenarien mit zusätzlichen Speichern (L-W-WP+PV+Sp. sowie S-W-WP+PV+Sp.) nochmals geringer aus. Hier beträgt die Reduktion typischerweise nur 0,01 m bis 0,015 m, also weniger als 5 %. In einzelnen Fällen, wie etwa im Szenario 50-S-K mit Speicher, liegt die Abweichung sogar unter 1 % und ist damit praktisch vernachlässigbar.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass der stärkste Effekt beim Heizstab mit einer Reduktion um ca. 0,05 m (10 %) auftritt. Wärmepumpensysteme ohne PV zeigen eine moderate Verringerung von 7 %–9 %, während Systeme mit Wärmepumpe und PV oder zusätzlichen Speichern nur noch sehr geringe Unterschiede aufweisen, meist unter 3 %–5 % und teilweise sogar kleiner als 1 %.

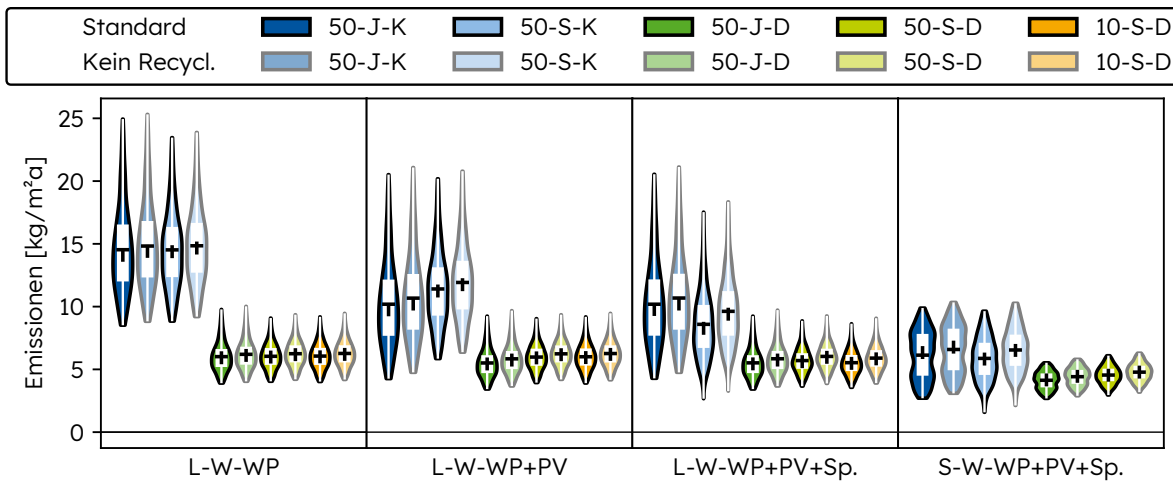
Damit ist der Einfluss des Recyclingpotentials zwar messbar und klar erkennbar, bleibt jedoch im Vergleich zum Effekt der Dekarbonisierung des Stromsektors deutlich nachrangig. Während das Recycling zu Abweichungen von maximal 0,05 m führt, verursacht die Stromsektordekarbonisierung Unterschiede von bis zu 0,15 m bzw. 30 %. Die Haupthypothese H6, dass der Einfluss des Recyclingpotentials gegenüber der Dekarbonisierung zweitrangig ist, wird somit bestätigt.

Abbildung 6.15 zeigt den Einfluss des Recyclingpotentials auf die spezifischen jährlichen Emissionen des Einfamilienhauses. Dargestellt sind die Ergebnisse für den Standardfall mit Berücksichtigung des Recyclingpotentials (gesättigte Farben) sowie für den Fall ohne Berücksichtigung des Recyclingpotentials (unge-sättigte Farben). Die Struktur der Violinplots entspricht den vorherigen Abbildungen.

Es zeigt sich, dass der Wegfall des Recyclingpotentials die jährlichen Emissionen in fast allen Szenarien leicht erhöht. Im Heizstab-Szenario steigen die Emissionen im Durchschnitt von  $18 \text{ kg CO}_2\text{-eq}/(\text{m}^2 \text{ a})$  auf  $18,6 \text{ kg CO}_2\text{-eq}/(\text{m}^2 \text{ a})$ , was einer Erhöhung von  $0,6 \text{ kg CO}_2\text{-eq}/(\text{m}^2 \text{ a})$  bzw. etwa 3 % entspricht. Für Wärmepumpen ohne PV (L-W-WP) ergibt sich ein Anstieg im Mittel von 11,5 auf  $11,8 \text{ kg CO}_2\text{-eq}/(\text{m}^2 \text{ a})$ ,



(a) Heizen



(b) Heizen + Kühlen

Abbildung 6.15.: Optimale Emissionswerte für das Einfamilienhaus in Abhängigkeit von Betriebsfall (nur Heizen bzw. Heizen + Kühlen), Gebäudetechnikvariante sowie den Modellierungsansätzen für den Stromsektor als Violinplots mit integriertem Boxplot für Optimierungen mit und ohne Einfluss des Recyclingpotentials

also um rund  $0,3 \text{ kg}_{\text{CO}_2\text{-eq}}/(\text{m}^2 \text{ a})$  (3%). Bei Wärmepumpen mit PV (L-W-WP+PV) fällt der Unterschied etwas stärker aus hier steigen die mittleren Emissionen von  $7,2$  um ca.  $0,5 \text{ kg}_{\text{CO}_2\text{-eq}}/(\text{m}^2 \text{ a})$  bzw. knapp 7% auf  $7,7 \text{ kg}_{\text{CO}_2\text{-eq}}/(\text{m}^2 \text{ a})$ . Sehr gering bleibt der Effekt in Szenarien mit PV und Speicher (L-W-WP+PV+Sp.), wo die mittleren Emissionen nur von  $7,2$  auf  $7,7 \text{ kg}_{\text{CO}_2\text{-eq}}/(\text{m}^2 \text{ a})$  steigen. Die entspricht einer

Differenz von  $0,5 \text{ kg CO}_2\text{-eq}/(\text{m}^2 \text{ a})$  beziehungsweise unter 5 %.

Im Heizen+Kühlen-Fall zeigt sich ein ähnliches Bild. Bei L-W-WP steigen die Werte im Durchschnitt von  $14,5$  auf  $14,8 \text{ kg CO}_2\text{-eq}/(\text{m}^2 \text{ a})$ , also um  $0,3 \text{ kg CO}_2\text{-eq}/(\text{m}^2 \text{ a})$  bzw. 2 %. Für L-W-WP+PV erhöht sich der Mittelwert von  $10,2$  auf  $10,7 \text{ kg CO}_2\text{-eq}/(\text{m}^2 \text{ a})$ , was einer Differenz von  $0,5 \text{ kg CO}_2\text{-eq}/(\text{m}^2 \text{ a})$  (5 %) entspricht. Bei L-W-WP+PV+Sp. ergibt sich ein Anstieg von  $10,2$  auf  $10,7 \text{ kg CO}_2\text{-eq}/(\text{m}^2 \text{ a})$ , also ebenfalls rund  $0,5 \text{ kg CO}_2\text{-eq}/(\text{m}^2 \text{ a})$  bzw. 5 %. Den geringsten Effekt zeigen Systeme mit S-W-WP+PV+Sp., die von  $6,1 \text{ kg CO}_2\text{-eq}/(\text{m}^2 \text{ a})$  auf  $6,6 \text{ kg CO}_2\text{-eq}/(\text{m}^2 \text{ a})$  ansteigen. Diese steigen also nur um  $0,45 \text{ kg CO}_2\text{-eq}/(\text{m}^2 \text{ a})$  bzw. unter 5 % an.

Zusammenfassend zeigt sich, dass der stärkste Effekt im Heizstab-Szenario auftritt, wo die Emissionen um rund  $0,6 \text{ kg CO}_2\text{-eq}/(\text{m}^2 \text{ a})$  bzw. etwa 3 % ansteigen. Wärmepumpensysteme ohne PV weisen dagegen nur einen moderaten Zuwachs von etwa  $0,3 \text{ kg CO}_2\text{-eq}/(\text{m}^2 \text{ a})$ , entsprechend 2 bis 3 %, auf. Bei Wärmepumpen mit PV sowie bei Wärmepumpen mit PV und zusätzlichem Speicher liegen die Erhöhungen bei durchschnittlich  $0,5 \text{ kg CO}_2\text{-eq}/(\text{m}^2 \text{ a})$ , was einer relativen Veränderung von 5 bis 7 % entspricht. Die geringsten Änderungen zeigen schließlich Systeme mit Speichern, bei denen die Unterschiede stets unter 5 % bleiben.

Damit bestätigt sich, dass das Recyclingpotential zwar einen messbaren, aber im Vergleich zur Stromsektordekarbonisierung (Differenzen von bis zu  $12 \text{ kg CO}_2\text{-eq}/(\text{m}^2 \text{ a})$ ) geringen Einfluss auf die Emissionen hat. Die Haupthypothese H6, dass der Einfluss des Recyclingpotentials im Verhältnis zu anderen Einflussfaktoren wie der Dekarbonisierung vernachlässigbar ist, wird somit bestätigt.

Die weiteren Ergebnisabbildungen sind im Anhang unter Abb. B.16 bis B.21 dargestellt. Auch für Schul-, Büro- und Industriegebäude zeigt sich durchweg ein ähnliches Bild wie beim Einfamilienhaus. Der Wegfall des Recyclingpotentials führt zu einem moderaten Anstieg der spezifischen jährlichen Emissionen, dessen Größenordnung jedoch klar hinter den Effekten der Stromsektordekarbonisierung zurückbleibt. Damit wird zugleich auch die Zusatzhypothese Z1 im Kontext der Haupthypothese H6 bestätigt, die besagt, dass die Gültigkeit der Haupthypothese unabhängig vom Gebäudetyp ist.

## 7. Zusammenfassung und Ausblick

Dieses Kapitel fasst zunächst die Arbeit zusammen und gibt anschließend einen Ausblick auf noch offene und weiterführende Fragestellungen.

### 7.1. Zusammenfassung

DLZA berücksichtigen zeitabhängige Veränderungen wie die Dekarbonisierung und Volatilität des Stromsektors, klimawandelbedingte Wetteränderungen, die Degradation von Gebäudetechnik und Dämmung sowie das Recyclingpotenzials am Lebensende.

In dieser Arbeit wurden Methoden entwickelt, um diese Effekte in DLZA zu integrieren und deren Einfluss auf die optimale Dimensionierung von Dämmung, Speichern und Gebäudetechnik zu bewerten. Analysiert wurden vier Gebäudetypen (Wohn-, Büro-, Bildungsgebäude, Gewerbehalle) sowie zwei Quartiere (Wohn- und Gewerbequartier). Grundlage bilden selbst berechnete detaillierte Lastprofile, Stromsektordaten von Blanke et al. [BLA26], Wetterdatensätze aus der Meteororm-Datenbank (inkl. RCP-Szenarien), sowie Produktdaten aus der hplib und pvlib sowie Emissionsdaten aus der ÖKOBAUDAT. Die Optimierung der Betriebs- und Konstruktionsemissionen erfolgt mit einer gemischt-ganzzahligen linearen Optimierung (MILP) auf Basis verschiedener Wärmepumpensysteme.

Es wurden sechs Haupthypothesen und zwei Zusatzhypothesen geprüft. Die Ergebnisse zeigen:

- Die Berücksichtigung der Dekarbonisierung des Stromsektors halbiert die optimale Dämmstärke in allen Varianten. So sinkt z. B. im Einfamilienhaus die mittlere Dämmstärke von rund 0,41 m auf 0,23 m (vgl. Haupthypothese H1, Abschnitt 6.1).
- Nur stündlich aufgelöste Stromsektordaten erlauben eine realistische Dimensionierung von thermischen und elektrischen Speichern. In den nicht stündlich aufgelösten Szenarien ergeben sich praktisch keine Speicher, während in den stündlich aufgelösten Szenarien z. B. für das Einfamilienhaus elektrische Spei-

cher von 17–20 kWh und Warmwasserspeicher von bis zu 140 kWh resultieren (vgl. Haupthypothese H2, Abschnitt 6.2).

- Marginale Stromsektordaten führen zu deutlich höheren Dämmstärken – typischerweise 25 %–50 % über die Szenarien mit durchschnittlichen Stromsektordaten. Besonders stark ist der Effekt beim reinen Heizstab-Betrieb, wo die Dämmstärke von 0,41 m auf 0,50 m ansteigt (vgl. Haupthypothese H3, Abschnitt 6.3).
- Der Einfluss von Wettervariabilität, Degradation und Recycling ist im Vergleich zur Dekarbonisierung deutlich geringer. Wettereffekte liegen meist unter 5 %, Degradation erhöht Dämmstärken um wenige Zentimeter (5–10 %), und der Wegfall des Recyclingpotentials reduziert Dämmstärken um maximal 0,05 m (10 %) (vgl. Haupthypothese H4, H5 und H6).
- Diese Muster zeigen sich konsistent über alle Gebäudetypen hinweg (vgl. Zusatzhypothese Z1), und die Haupthypothesen H1 und H2 gelten auch auf Quartiersebene (vgl. Zusatzhypothese Z2).

Die Ergebnisse dieser Arbeit erlauben mehrere Schlussfolgerungen für die Anwendung von DLZA im Gebäudesektor.

Zentral ist, dass die Berücksichtigung der Stromsektordekarbonisierung unverzichtbar ist. Ohne sie werden ökologische Optima systematisch überschätzt. Ebenso gilt, dass nur stündlich aufgelöste Emissionswerte eine belastbare Bewertung von Speichern ermöglichen – Jahresmittelwerte unterschätzen den Bedarf deutlich.

Die weiteren Einflussfaktoren – Wettervariabilität, Degradation und Recycling – erweisen sich dagegen als nachrangig. Für praxisnahe Wetteranalysen erscheinen nicht komplexe Klimaszenarien, sondern vielmehr unterschiedliche Testreferenzjahre mit extremen Sommer- und Wintersituationen (vgl. Kapitel 2.5) zweckmäßig.

Die Analyse marginaler Emissionen zeigt schließlich, dass sie zwar zu deutlich höheren Dämmstärken führen, sich aber eher für Echtzeit-Betriebsoptimierung und Lastmanagement eignen. Für langfristige Planungs- und Bewertungsstudien ist dagegen die Verwendung dekarbonisierter Durchschnittswerte konsistenter.

Zusammenfassend lassen sich die zentralen Schlussfolgerungen wie folgt benennen:

- Die Berücksichtigung der Dekarbonisierung des Stromsektors ist zwingend notwendig, da andernfalls Dämmstärken überschätzt werden.
- Nur stündlich aufgelöste Stromsektordaten erlauben eine realistische Bewertung von Speichern.
- Degradation, Recycling und Wettereinflüsse sind gegenüber der Dekarbonisierung nachrangig, können aber in Einzelfällen kleinere Abweichungen verursachen.
- Für den Wettereinfluss erscheint es praxisnah, unterschiedliche Testreferenzjahre (z. B. DWD mit warmen Sommern und kalten Wintern) einzusetzen, statt komplexe Klimaszenarien.
- Die Berücksichtigung von marginalen Emissionen führt zwar zu deutlich höheren Dämmstärken, eignet sich jedoch eher für Echtzeit-Betriebsoptimierungen als für strategische Langfristbewertung.

## 7.2. Ausblick

Im Rahmen dieser Arbeit wurden zahlreiche Variationen der Basiskonfiguration der Gebäude untersucht, sodass durch insgesamt 256 bis 512 Varianten pro Gebäudetyp bereits eine umfassende Sensitivitätsanalyse im engeren Sinne durchgeführt wurde. Dennoch ergeben sich weitere Anschlussfragen, die über den Rahmen dieser Arbeit hinausgehen.

Zum einen beschränkt sich die vorliegende Untersuchung auf die Wirkungskategorie der Treibhausgasemissionen. Eine vollständige LZA umfasst jedoch weitere Umweltwirkungen, wie etwa Versauerung und Eutrophierung von Böden und Gewässern oder Ressourcenverbrauch. Künftige Arbeiten sollten die entwickelten Methoden daher auf zusätzliche Wirkungskategorien übertragen.

Auch die Erweiterung auf weitere Gebäudetypen und Quartiere, insbesondere auf Mehrfamilienhäuser oder gemischt genutzte Gebäudeensembles, kann neue Erkenntnisse liefern und die Gültigkeit der Forschungshypothesen differenzierter prüfen. Darüber hinaus basiert die Analyse des Stromsektors auf einem spezifischen Datensatz Blanke et al. [BLA26] und bezieht sich ausschließlich auf

Deutschland. Da die Entwicklung des Strommarktes hochdynamisch ist und sich regional deutlich unterscheiden kann, stellt die Untersuchung alternativer Datensätze sowie die stärkere Regionalisierung der Stromsektordaten einen wichtigen Ansatzpunkt für künftige Forschung dar.

Ein weiterer relevanter Einflussfaktor ist das Nutzerverhalten, das sich über den Betrachtungszeitraum stark verändern kann. Dieses konnte aufgrund der Komplexität der Prognose nicht berücksichtigt werden, bietet aber erhebliches Potenzial für künftige Analysen.

Methodisch bietet sich zudem die Integration systematischer Unsicherheitsanalysen an, etwa durch probabilistische Ansätze oder Monte-Carlo-Simulationen. Damit könnte die Robustheit der Ergebnisse unter variierenden Strommarkt-, Wetter- und Nutzerannahmen stärker quantifiziert werden. Auch die Weiterentwicklung der Optimierungsansätze, beispielsweise durch multi-objektive Verfahren, die ökologische und ökonomische Zielgrößen gemeinsam betrachten, eröffnet neue Perspektiven.

Schließlich erscheint es sinnvoll, die entwickelten Verfahren stärker in eine übergeordnete Energiesystemperspektive einzubetten. Durch die Kopplung der Gebäudebewertung mit Strom-, Wärme- und Mobilitätssektoren könnten systemische Rückkopplungen sichtbar gemacht werden. Darüber hinaus sollten künftige Arbeiten prüfen, wie sich dynamische LZA-Ansätze in bestehende Normen, Förderinstrumente und Planungspraktiken integrieren lassen, um den Transfer in die Anwendung zu erleichtern.

# Literatur

- [AAS22] Per Aaslid, Magnus Korpas, Michael M Belsnes und Olav B Fosso. „Stochastic Optimization of Microgrid Operation With Renewable Generation and Energy Storages“. In: IEEE Transactions on Sustainable Energy 13.3 (Juli 2022), S. 1481–1491. ISSN: 1949-3037. DOI: 10.1109/tste.2022.3156069. URL: <https://doi.org/10.1109/TSTE.2022.3156069>.
- [ABE21] Andreas Abegg und Oliver Streiff. Die Wiederverwendung von Bauteilen. Dike Verlag AG, Feb. 2021. ISBN: 9783038913085. DOI: 10.3256/978-3-03929-005-5. URL: <https://doi.org/10.3256/978-3-03929-005-5>.
- [AGU20] Jorge Luis Aguilar-Santana, Mariana Velasco-Carrasco und Saffa Riffat. „Thermal Transmittance (U-value) Evaluation of Innovative Window Technologies“. In: Future Cities and Environment 6.1 (2020). ISSN: 2363-9075. DOI: 10.5334/fce.99. URL: <https://doi.org/10.5334/fce.99>.
- [AL-24] Zaid Al-Atari, Rob Shipman und Mark Gillott. „Optimisation of Integrated Heat Pump and Thermal Energy Storage Systems in Active Buildings for Community Heat Decarbonisation“. In: Energies 17.21 (Okt. 2024), S. 5310. ISSN: 1996-1073. DOI: 10.3390/en17215310. URL: <https://doi.org/10.3390/en17215310>.
- [ALB14] Andrej Albert, Hrsg. Bautabellen für Ingenieure: Mit Berechnungshinweisen und Beispielen. 21. Aufl. Köln: Bundesanzeiger Verl. und Werner/Wolters Kluwer, 2014. ISBN: 978-3-8462-0304-0.
- [ALI24a] Aamir Ali, Ateeq-u-Rehman Bughio, Ghulam Abbas, M.U. Keerio, N.H. Mugheri, Shaina Memon und A.S. Saand. „Optimization of distributed energy resources planning and battery energy storage management via large-scale multi-objective evolutionary algorithm“. In: Energy 311 (Dez. 2024), S. 133463. ISSN: 0360-5442. DOI: 10.1016/j.energy.2024.133463. URL: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.133463>.
- [ALI24b] Amir Ali, Anas Issa und Ahmed Elshaer. „A Comprehensive Review and Recent Trends in Thermal Insulation Materials for Energy Conservation in Buildings“. In: Sustainability 16.20 (Okt. 2024), S. 8782. ISSN: 2071-1050. DOI: 10.3390/su16208782. URL: <https://doi.org/10.3390/su16208782>.

- [AME21] Kevin L. Amende, Julia A. Keen, Lynn E. Catlin, Megan Tosh, Andrew M. Sneed und Ronald H. Howell. Principles of Heating, Ventilating, and Air Conditioning. 9. Aufl. Based on content from the 2021 ASHRAE Handbook–Fundamentals. Peachtree Corners, GA: ASHRAE, 2021. ISBN: 9781947192690.
- [AYA21] Leslie Ayagapin, Jean Philippe Praene, Doorgeshwaree Jaggeshar und Dinesh Surroop. „Prospective Life Cycle Assessment: Effect of Electricity Decarbonization in Building Sector“. In: *Energies* 14.11 (Mai 2021), S. 3184. ISSN: 1996-1073. DOI: 10.3390/en14113184. URL: <https://doi.org/10.3390/en14113184>.
- [BAA22] Florian Joseph Baader, André Bardow und Manuel Dahmen. „Simultaneous mixed-integer dynamic scheduling of processes and their energy systems“. In: *AIChE Journal* 68.8 (Mai 2022). ISSN: 1547-5905. DOI: 10.1002/aic.17741. URL: <https://doi.org/10.1002/aic.17741> (besucht am 19.12.2024).
- [BAL20a] Ilaria Ballarini, Andrea Costantino, Enrico Fabrizio und Vincenzo Corrado. „A Methodology to Investigate the Deviations between Simple and Detailed Dynamic Methods for the Building Energy Performance Assessment“. In: *Energies* 13.23 (2020), S. 6217. DOI: 10.3390/en13236217. URL: <https://doi.org/10.3390/en13236217> (besucht am 25.10.2023).
- [BAL20b] Ilaria Ballarini, Andrea Costantino, Enrico Fabrizio und Vincenzo Corrado. „The Dynamic Model of EN ISO 52016-1 for the Energy Assessment of Buildings Compared to Simplified and Detailed Simulation Methods“. In: *Proceedings of Building Simulation 2019: 16th Conference of IBPSA*. Hrsg. von Vincenzo Corrado, Enrico Fabrizio, Andrea Gasparella und Francesco Patuzzi. Building Simulation Conference Proceedings. IBPSA, 2020, S. 3847–3854. DOI: 10.26868/25222708.2019.210431. URL: <https://doi.org/10.26868/25222708.2019.210431> (besucht am 25.10.2023).
- [BAR06] L.A. Barroso und A.J. Conejo. „Decision making under uncertainty in electricity markets“. In: *2006 IEEE Power Engineering Society General Meeting*. IEEE, 2006, S. 3. DOI: 10.1109/pes.2006.1709323. URL: <https://doi.org/10.1109/PES.2006.1709323>.
- [BAS22] Tariq Bashir, Sara Adeeba Ismail, Yuheng Song, Rana Muhammad Irfan, Shiqi Yang, Shaowen Zhou, Jianqing Zhao und Lijun Gao. „A review of the energy storage aspects of chemical elements for lithium-ion based batteries“. In: *Energy Materials* 1.2 (2022), S. 100019. ISSN: 2770-5900. DOI: 10.20517/energymater.2021.20. URL: <https://doi.org/10.20517/energymater.2021.20>.

- [BBS23] BBSR, Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen. ÖKOBAUDAT. 2023. URL: <https://www.oekobaudat.de/> (besucht am 27.06.2023).
- [BBS24a] BBSR, Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen. ÖKOBAUDAT: Lithium Eisenphosphat (LFP) Batterie (pro 1kWh Speicherkapazität). 2024. URL: [https://oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=c64f9557-37d7-40f6-b118-a35dc72fc45c&version=20.23.050&stock=OBD\\_2023\\_I&lang=de](https://oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=c64f9557-37d7-40f6-b118-a35dc72fc45c&version=20.23.050&stock=OBD_2023_I&lang=de) (besucht am 28.03.2024).
- [BBS24b] BBSR, Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen. ÖKOBAUDAT: Prozess-Datensatz: Elektrischer Durchlauferhitzer (21 kW). 2024. URL: [https://oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=bd992ce2-8dd4-4af5-bca1-72dcbf2b5506&version=20.23.050&stock=OBD\\_2023\\_I&lang=de](https://oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=bd992ce2-8dd4-4af5-bca1-72dcbf2b5506&version=20.23.050&stock=OBD_2023_I&lang=de) (besucht am 28.03.2024).
- [BBS24c] BBSR, Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen. ÖKOBAUDAT: Prozess-Datensatz: EPS-Hartschaum (Rohdichte 15 kg/m<sup>3</sup>). 2024. URL: [https://oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=205b761d-e344-49c3-a3a9-bb1bfd59b916&version=00.02.000&stock=OBD\\_2023\\_I&lang=de](https://oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=205b761d-e344-49c3-a3a9-bb1bfd59b916&version=00.02.000&stock=OBD_2023_I&lang=de) (besucht am 29.03.2024).
- [BBS24d] BBSR, Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen. ÖKOBAUDAT: Prozess-Datensatz: EPS-Hartschaum (Rohdichte 20 kg/m<sup>3</sup>). 2024. URL: [https://oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=757297f1-9325-4df4-af51-96510be76bf3&version=00.02.000&stock=OBD\\_2023\\_I&lang=de](https://oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=757297f1-9325-4df4-af51-96510be76bf3&version=00.02.000&stock=OBD_2023_I&lang=de) (besucht am 29.03.2024).
- [BBS24e] BBSR, Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen. ÖKOBAUDAT: Prozess-Datensatz: EPS-Hartschaum (Rohdichte 25 kg/m<sup>3</sup>). 2024. URL: [https://oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=cb582d00-b984-4bb8-ab2e-5302678a721d&version=00.02.000&stock=OBD\\_2023\\_I&lang=de](https://oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=cb582d00-b984-4bb8-ab2e-5302678a721d&version=00.02.000&stock=OBD_2023_I&lang=de) (besucht am 29.03.2024).
- [BBS24f] BBSR, Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen. ÖKOBAUDAT: Prozess-Datensatz: EPS-Hartschaum (Rohdichte 30 kg/m<sup>3</sup>). 2024. URL: [https://oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=4e83c488-bb36-40b0-bfd4-b2aa7f1c0f04&version=00.02.000&stock=OBD\\_2023\\_I&lang=de](https://oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=4e83c488-bb36-40b0-bfd4-b2aa7f1c0f04&version=00.02.000&stock=OBD_2023_I&lang=de) (besucht am 29.03.2024).

- [BBS24g] BBSR, Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen. ÖKOBAUDAT: Prozess-Datensatz: Extrudierter Polystyrol Dämmstoff. 2024. URL: [https://oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=37f50a3e-5445-4bce-8eda-98f01dba441f&version=20.23.050&stock=OBD\\_2023\\_I&lang=de](https://oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=37f50a3e-5445-4bce-8eda-98f01dba441f&version=20.23.050&stock=OBD_2023_I&lang=de) (besucht am 29.03.2024).
- [BBS24h] BBSR, Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen. ÖKOBAUDAT: Prozess-Datensatz: Holzfaserdämmplatte (Nassverfahren). 2024. URL: [https://oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=eefa40b3-7156-43a9-b197-b908f204432b&version=20.23.050&stock=OBD\\_2023\\_I&lang=de](https://oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=eefa40b3-7156-43a9-b197-b908f204432b&version=20.23.050&stock=OBD_2023_I&lang=de) (besucht am 29.03.2024).
- [BBS24i] BBSR, Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen. ÖKOBAUDAT: Prozess-Datensatz: Mineralwolle-Dämmstoff im mittleren Rohdichtebereich (de). 2024. URL: [https://oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=699e3d57-72b4-402d-a0ee-cebb06f3cdf1&version=00.08.000&stock=OBD\\_2023\\_I&lang=de](https://oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=699e3d57-72b4-402d-a0ee-cebb06f3cdf1&version=00.08.000&stock=OBD_2023_I&lang=de) (besucht am 29.03.2024).
- [BBS24j] BBSR, Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen. ÖKOBAUDAT: Prozess-Datensatz: Photovoltaiksystem 1200 kWh/m<sup>2</sup>\*a ohne Stromgutschrift. 2024. URL: [https://oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=0c3eab92-5a2b-415a-a641-22542c7134fe&version=20.23.050&stock=OBD\\_2023\\_I&lang=de](https://oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=0c3eab92-5a2b-415a-a641-22542c7134fe&version=20.23.050&stock=OBD_2023_I&lang=de) (besucht am 25.03.2024).
- [BBS24k] BBSR, Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen. ÖKOBAUDAT: Prozess-Datensatz: PIR Hartschaum. 2024. URL: [https://oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=c2ba651c-00bf-4f69-a0dc-a6a5fe680652&version=20.23.050&stock=OBD\\_2023\\_I&lang=de](https://oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=c2ba651c-00bf-4f69-a0dc-a6a5fe680652&version=20.23.050&stock=OBD_2023_I&lang=de) (besucht am 29.03.2024).
- [BBS24l] BBSR, Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen. ÖKOBAUDAT: Prozess-Datensatz: Pufferspeicher (Edelstahl) (de). 2024. URL: [https://oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=6899ae8e-86d3-42d0-a1ba-efe711b3aef2&version=20.23.050&stock=OBD\\_2023\\_I&lang=de](https://oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=6899ae8e-86d3-42d0-a1ba-efe711b3aef2&version=20.23.050&stock=OBD_2023_I&lang=de) (besucht am 28.03.2024).
- [BBS24m] BBSR, Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen. ÖKOBAUDAT: Prozess-Datensatz: Pufferspeicher (Stahl). 2024. URL: <https://oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=6a3a34ff-d40c-474b-9039-4f8db6e7c732&>

version=20.23.050&stock=OBD\_2023\_I&lang=de (besucht am 28.03.2024).

- [BBS24n] BBSR, Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen. ÖKOBAUDAT: Prozess-Datensatz: Strom-Wärmepumpe (Luft-Wasser) 10 kW. 2024. URL: [https://oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=00ab3cef-5d1b-48c8-a220-4f8ac01b7dd7&version=20.23.050&stock=OBD\\_2023\\_I&lang=de](https://oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=00ab3cef-5d1b-48c8-a220-4f8ac01b7dd7&version=20.23.050&stock=OBD_2023_I&lang=de) (besucht am 28.03.2024).
- [BBS24o] BBSR, Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen. ÖKOBAUDAT: Prozess-Datensatz: Strom-Wärmepumpe (Luft-Wasser) 14 kW. 2024. URL: [https://oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=19a1a962-7b4b-45e8-8446-c82a15675925&version=20.23.050&stock=OBD\\_2023\\_I&lang=de](https://oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=19a1a962-7b4b-45e8-8446-c82a15675925&version=20.23.050&stock=OBD_2023_I&lang=de) (besucht am 28.03.2024).
- [BBS24p] BBSR, Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen. ÖKOBAUDAT: Prozess-Datensatz: Strom-Wärmepumpe (Luft-Wasser) 7 kW. 2024. URL: [https://oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=d59feef8-7a26-499b-a9d8-7149b5d3de24&version=20.23.050&stock=OBD\\_2023\\_I&lang=de](https://oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=d59feef8-7a26-499b-a9d8-7149b5d3de24&version=20.23.050&stock=OBD_2023_I&lang=de) (besucht am 28.03.2024).
- [BBS24q] BBSR, Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen. ÖKOBAUDAT: Prozess-Datensatz: Strom-Wärmepumpe (Sole-Wasser, Erdkollektor) 10 kW. 2024. URL: [https://oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=d4c60a37-2753-4f45-9bfe-4cefe31fd857&version=20.23.050&stock=OBD\\_2023\\_I&lang=de](https://oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=d4c60a37-2753-4f45-9bfe-4cefe31fd857&version=20.23.050&stock=OBD_2023_I&lang=de) (besucht am 28.03.2024).
- [BBS24r] BBSR, Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen. ÖKOBAUDAT: Prozess-Datensatz: Strom-Wärmepumpe (Sole-Wasser, Erdkollektor) 20 kW. 2024. URL: [https://oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=c5dfadb5-96a0-44fb-ac93-3cd1c4786e96&version=20.23.050&stock=OBD\\_2023\\_I&lang=de](https://oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=c5dfadb5-96a0-44fb-ac93-3cd1c4786e96&version=20.23.050&stock=OBD_2023_I&lang=de) (besucht am 28.03.2024).
- [BBS24s] BBSR, Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen. ÖKOBAUDAT: Prozess-Datensatz: Strom-Wärmepumpe (Sole-Wasser, Erdkollektor) 70 kW. 2024. URL: [https://oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=4058e075-4b05-452b-b3a8-17c2378026df&version=20.23.050&stock=OBD\\_2023\\_I&lang=de](https://oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=4058e075-4b05-452b-b3a8-17c2378026df&version=20.23.050&stock=OBD_2023_I&lang=de) (besucht am 28.03.2024).

- [BBS24t] BBSR, Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen. ÖKOBAUDAT: Prozess-Datensatz: Zellulosefaserplatten. 2024. URL: [https://oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=acf6b988-2458-4ddc-ae8-9a6cd3a78485&version=20.23.050&stock=OBD\\_2023\\_I&lang=de](https://oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=acf6b988-2458-4ddc-ae8-9a6cd3a78485&version=20.23.050&stock=OBD_2023_I&lang=de) (besucht am 29.03.2024).
- [BBS24u] BBSR, Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen. ÖKOBAUDAT: Rohre für Strom-Wärmepumpe (Sole-Wasser, Erdsonde) 10 kW. 2024. URL: [https://oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=87e96a7e-8a0b-432f-930b-6b06d07c12c7&version=20.23.050&stock=OBD\\_2023\\_I&lang=de](https://oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=87e96a7e-8a0b-432f-930b-6b06d07c12c7&version=20.23.050&stock=OBD_2023_I&lang=de) (besucht am 28.03.2024).
- [BBS24v] BBSR, Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen. ÖKOBAUDAT: Rohre für Strom-Wärmepumpe (Sole-Wasser, Erdsonde) 20 kW. 2024. URL: [https://oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=93a80673-df5c-4432-958f-f241ff31fd9a&version=20.23.050&stock=OBD\\_2023\\_I&lang=de](https://oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=93a80673-df5c-4432-958f-f241ff31fd9a&version=20.23.050&stock=OBD_2023_I&lang=de) (besucht am 28.03.2024).
- [BBS24w] BBSR, Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen. ÖKOBAUDAT: Rohre für Strom-Wärmepumpe (Sole-Wasser, Erdsonde) 70 kW. 2024. URL: [https://oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=734f7419-1378-4b79-af5e-09297e5965d9&version=20.23.050&stock=OBD\\_2023\\_I&lang=de](https://oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=734f7419-1378-4b79-af5e-09297e5965d9&version=20.23.050&stock=OBD_2023_I&lang=de) (besucht am 28.03.2024).
- [BBS25a] BBSR, Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen. ÖKOBAUDAT: Prozess-Datensatz: Kältemaschine (500kW). März 2025. URL: <https://oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=cc071698-9d73-4315-b470-e13dfcdba10a&version=20.24.070>.
- [BBS25b] BBSR, Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen. ÖKOBAUDAT: Prozess-Datensatz: Solaranlage Flachkollektor. März 2025. URL: <https://oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=413ba0ce-2a78-44e2-89d2-d9adfd4e492c&version=20.24.070>.
- [BCG21] BCG, Boston Consulting Group. Klimapfade 2.0: Ein Wirtschaftsprogramm für Klima und Zukunft. 2021. URL: [https://issuu.com/bdi-berlin/docs/211021\\_bdi\\_klimapfade\\_2.0\\_-\\_gesamtstudie\\_-\\_vorabve](https://issuu.com/bdi-berlin/docs/211021_bdi_klimapfade_2.0_-_gesamtstudie_-_vorabve) (besucht am 23.06.2023).
- [BDE17] BDEW. Standardlastprofile Strom. 2017. URL: <https://www.bdew.de/energie/standardlastprofile-strom/> (besucht am 25.10.2023).

- [BEE14] Harald Beese, Wulf Grählert und Susann Schulz. Entwicklung von Permeationsmesstechnik zur Bestimmung der für Vakuum-Isolations-Paneele (VIP) kritischen Gasdurchlässigkeit. [Abschlussbericht] ; [Forschungsinitiative Zukunft Bau - ein Forschungsprogramm des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS)] ; Projektlaufzeit: 01.07.2011 bis 31.07.2013. Forschungsinitiative ZukunftBau. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verl., 2014. 82 S. ISBN: 9783816792376.
- [BIL24] Matteo Bilardo, Enrico Fabrizio und Riccardo Oldini. „Dynamic evaluation of the electrical primary energy factor for building energy performance: Insights from 2022 Italian data“. In: E3S Web of Conferences 523 (2024). Hrsg. von M. Noro und C. Zilio, S. 05005. ISSN: 2267-1242. DOI: 10.1051/e3sconf/202452305005. URL: <http://dx.doi.org/10.1051/e3sconf/202452305005>.
- [BIY17] Emrah Biyik, Mustafa Araz, Arif Hepbasli, Mehdi Shahrestani, Runming Yao, Li Shao, Emmanuel Essah, Armando C. Oliveira, Teodosio del Caño, Elena Rico, Juan Luis Lechón, Luisa Andrade, Adélio Mendes und Yusuf Bayer Atli. „A key review of building integrated photovoltaic (BIPV) systems“. In: Engineering Science and Technology, an International Journal 20.3 (Juni 2017), S. 833–858. ISSN: 2215-0986. DOI: 10.1016/j.jestch.2017.01.009. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2017.01.009> (besucht am 13. 08. 2025).
- [BIZ23] Marco Bizzarri, Paolo Conti, Leon R. Glicksman, Eva Schito und Daniele Testi. „Radiant Floor Cooling Systems: A Critical Review of Modeling Methods“. In: Energies 16.17 (Aug. 2023), S. 6160. ISSN: 1996-1073. DOI: 10.3390/en16176160. URL: <https://doi.org/10.3390/en16176160>.
- [BLA21a] Tobias Blanke, Markus Hagenkamp, Bernd Döring, Joachim Götttsche, Vitali Reger und Markus Kuhnhenne. „Net-exergetic, hydraulic and thermal optimization of coaxial heat exchangers using fixed flow conditions instead of fixed flow rates“. In: Geothermal Energy 9.1 (2021). DOI: 10.1186/s40517-021-00201-3. URL: <https://doi.org/10.1186/s40517-021-00201-3> (besucht am 23. 06. 2023).
- [BLA21b] Tobias Blanke, Markus Hagenkamp, Joachim Götttsche, Bernd Döring, Vitali Reger und Markus Kuhnhenne. „LCA optimal sizing of smart buildings’ energy system components considering flexible grid-footprints“. In: Proceedings of Building Simulation 2021: 17th Conference of IBPSA. Building Simulation Conference Proceedings. KU Leuven, 2021. DOI: 10.26868/25222708.2021.30619. URL:

- <https://doi.org/10.26868/25222708.2021.30619> (besucht am 23.06.2023).
- [BLA21c] Tobias Blanke, Vitali Reger, Bernd Döring, Joachim Götttsche und Markus Kuhnhenne. „Koaxiale Stahlenergiepfähle“. In: Stahlbau 90.6 (2021), S. 417–424. ISSN: 0038-9145. DOI: 10.1002/stab.202100028. URL: <https://doi.org/10.1002/stab.202100028> (besucht am 23.06.2023).
- [BLA22] Tobias Blanke, Katharina S. Schmidt, Joachim Götttsche, Bernd Döring, Jérôme Frisch und Christoph van Treeck. „Time series aggregation for energy system design: review and extension of modelling seasonal storages“. In: Energy Informatics 5.S1 (2022). DOI: 10.1186/s42162-022-00208-5. URL: <https://doi.org/10.1186/s42162-022-00208-5> (besucht am 23.06.2023).
- [BLA24a] Tobias Blanke, Holger Born, Joachim Götttsche, Ulf Herrmann, Bernd Döring, Jérôme Frisch und Christoph van Treeck. „Model For Dimensioning Borehole Heat Exchanger Applied To Mixed-Integer-Linear-Problem (MILP) Energy System Optimization“. In: (2024). Wird noch veröffentlicht. DOI: 10.1186/s40517-024-00301-w. URL: <https://doi.org/10.1186/s40517-024-00301-w>.
- [BLA24b] Tobias Blanke, Joachim Götttsche, Bernd Döring, Jérôme Frisch und Christoph van Treeck. „From building load profile to district load profile - a comparison of up-scaling methods“. In: BauSIM (2024). DOI: 10.26868/29761662.2024.21. URL: <https://doi.org/10.26868/29761662.2024.21>.
- [BLA26] Tobias Blanke, Joachim Götttsche, Bernd Döring, Jérôme Frisch und Christoph van Treeck. „Prospective dynamic average and marginal electricity emission factors for Germany until 2070: A methodological extension incorporating energy storage“. In: Energy, Sustainability and Society (2026). DOI: 10.1186/s13705-026-00562-2.
- [BLO22] Blocon AB. EED FAQ – Commonly asked questions about the Earth Energy Designer. Frequently Asked Questions, Earth Energy Designer (EED). 2022. URL: <https://buildingphysics.com/download/eedfaq.pdf> (besucht am 21.08.2025).
- [BMW23] Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz BMWK. Gebäudeenergiegesetz (GEG) - Gesetz zur Einsparung von Energie und zur Nutzung erneuerbarer Energien zur Wärme- und Kälteerzeugung in Gebäuden. 2023. URL: <https://www.gesetze-im-internet.de/geg/> (besucht am 20.12.2024).

- [BÖC17] Peter von Böckh und Matthias Stripf. „Wärmepumpen“. In: Thermische Energiesysteme. Springer Berlin Heidelberg, Okt. 2017, S. 229–247. ISBN: 9783662553350. DOI: 10.1007/978-3-662-55335-0\_9.
- [BON24] Pierluigi Bonomo und Francesco Frontini. „Building Integrated Photovoltaics (BIPV): Analysis of the Technological Transfer Process and Innovation Dynamics in the Swiss Building Sector“. In: Buildings 14.6 (Mai 2024), S. 1510. ISSN: 2075-5309. DOI: 10.3390/buildings14061510. URL: <https://doi.org/10.3390/buildings14061510> (besucht am 13.08.2025).
- [BOR23] André Borbe. Vakuumdämmung: Eigenschaften, Kosten, Vor- und Nachteile. Nov. 2023. URL: <https://www.haus.de/bauen/vakuumdaemmung-35348>.
- [BRO24] Christopher S. Brown, Isa Kolo, David Banks und Gioia Falcone. „Comparison of the thermal and hydraulic performance of single U-tube, double U-tube and coaxial medium-to-deep borehole heat exchangers“. In: Geothermics 117 (Feb. 2024), S. 102888. ISSN: 0375-6505. DOI: 10.1016/j.geothermics.2023.102888. URL: <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2023.102888>.
- [BRÜ12] Christoph Kaup Brücken. „Wirtschaftliche Bewertung und Optimierung von Wärmerückgewinnungssystemen“. In: (2012). URL: [https://www.howatherm.de/download/72\\_optimierungwrgsystemehlh0612\\_2/](https://www.howatherm.de/download/72_optimierungwrgsystemehlh0612_2/) (besucht am 22.10.2023).
- [BUF19] Simone Buffa, Marco Cozzini, Matteo D’Antoni, Marco Baratieri und Roberto Fedrizzi. „5th generation district heating and cooling systems: A review of existing cases in Europe“. In: Renewable and Sustainable Energy Reviews 104 (Apr. 2019), S. 504–522. ISSN: 1364-0321. DOI: 10.1016/j.rser.2018.12.059. URL: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.12.059>.
- [BUN22] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV). Verordnung über die Bewirtschaftung von gewerblichen Siedlungsabfällen und von bestimmten Bau- und Abbruchabfällen. Verordnung. BGBl. I 2017, Nr. 22, S. 896–904. 28. Apr. 2022. URL: [https://www.gesetze-im-internet.de/gewabfv\\_2017/BJNR089600017.html](https://www.gesetze-im-internet.de/gewabfv_2017/BJNR089600017.html) (besucht am 20.08.2025).
- [BUN23] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz. Verordnung über die Verwendung von Ersatzbaustoffen (Ersatzbaustoffverordnung – EBV). BGBl. I S. 2598. in Kraft seit 1. August 2023. 2023. URL: <https://www.gesetze-im-internet.de/ersatzbaustoffv>.

- [BUN24] Statistisches Bundesamt. 31111-0005: Baugenehmigungen neuer Gebäude: Deutschland, Jahre, Gebäudeart, Energieverwendung, Energieart. 2024. URL: <https://www-genesis.destatis.de/genesis/online?operation=table&code=31111-0005> (besucht am 03.05.2024).
- [BUN25] Bundesverband Wärmepumpe e.V. Zahlen, Daten, Fakten zur Wärmepumpe. Abruf am 21.08.2025. 2025. URL: <https://www.waermepumpe.de/presse/zahlen-daten/> (besucht am 21.08.2025).
- [BUR23] Jens Burkhardt. 15 Deutsche Solarhersteller und PV-Module aus Deutschland (2023). 2023. URL: <https://echtsolar.de/deutsche-solarmodule-hersteller/> (besucht am 23.11.2023).
- [BV24] PRé Sustainability B.V. ecoinvent LCI database. 2024. URL: <https://simapro.com/products/ecoinvent/> (besucht am 08.12.2024).
- [BWP23] Bundesverband Wärmepumpe e. V. BWP. Branchenstudie 2023: Marktentwicklung - Prognose - Handlungsempfehlungen. 2023. URL: [https://www.waermepumpe.de/fileadmin/user\\_upload/waermepumpe/05\\_Presse/01\\_Pressemitteilungen/BWP\\_Branchenstudie\\_2023\\_DRUCK.pdf](https://www.waermepumpe.de/fileadmin/user_upload/waermepumpe/05_Presse/01_Pressemitteilungen/BWP_Branchenstudie_2023_DRUCK.pdf) (besucht am 02.10.2024).
- [CAL13] Gloria Calleja Rodríguez, Antonio Carrillo Andrés, Fernando Domínguez Muñoz, José Manuel Cejudo López und Yi Zhang. „Uncertainties and sensitivity analysis in building energy simulation using macroparameters“. In: *Energy and Buildings* 67 (Dez. 2013), S. 79–87. ISSN: 0378-7788. DOI: 10.1016/j.enbuild.2013.08.009. URL: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.08.009>.
- [CAL23] Katherine Calvin u. a. IPCC, 2023: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland. Hrsg. von Paola Arias, Mercedes Bustamante, Ismail Elgizouli, Gregory Flato, Mark Howden, Carlos Méndez-Vallejo, Joy Jacqueline Pereira, Ramón Pichs-Madruga, Steven K. Rose, Yamina Saheb, Roberto Sánchez Rodríguez, Diana Ürge-Vorsatz, Cunde Xiao, Nouredine Yassaa, José Romero, Jinmi Kim, Erik F. Haites, Yonghun Jung, Robert Stavins, Arlene Birt, Meeyoung Ha, Dan Jezreel A. Orendain, Lance Ignon, Semin Park, Youngin Park, Andy Reisinger, Diego Cammaramo, Andreas Fischlin, Jan S. Fuglestvedt, Gerrit Hansen, Chloé Ludden, Valérie Masson-Delmotte, J.B. Robin Matthews, Katja Mintenbeck, Anna Pirani, Elvira Poloczanska, Noémie Leprince-Ringuet und Clotilde Péan. Juli 2023. DOI: 10.59327/

- ipcc/ar6-9789291691647. URL: [https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC\\_AR6\\_SYR\\_LongerReport.pdf](https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC_AR6_SYR_LongerReport.pdf) (besucht am 01. 10. 2024).
- [CAR20] Salvatore Carlucci, Marilena De Simone, Steven K. Firth, Mikkel B. Kjærgaard, Romana Markovic, Mohammad Saiedur Rahaman, Masab Khalid Annaqeeb, Silvia Biandrate, Anooshmita Das, Jakub Wladyslaw Dziedzic, Gianmarco Fajilla, Matteo Favero, Martina Ferrando, Jakob Hahn, Mengjie Han, Yuzhen Peng, Flora Salim, Arno Schlüter und Christoph van Treeck. „Modeling occupant behavior in buildings“. In: *Building and Environment* 174 (Mai 2020), S. 106768. ISSN: 0360-1323. DOI: 10.1016/j.buildenv.2020.106768. URL: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.106768>.
- [CHE09] Haisheng Chen, Thang Ngoc Cong, Wei Yang, Chunqing Tan, Yongliang Li und Yulong Ding. „Progress in electrical energy storage system: A critical review“. In: *Progress in Natural Science* 19.3 (März 2009), S. 291–312. ISSN: 1002-0071. DOI: 10.1016/j.pnsc.2008.07.014. URL: <https://doi.org/10.1016/j.pnsc.2008.07.014>.
- [CHE17] Ruiyong Chen, Sangwon Kim und Zhenjun Chang. „Redox Flow Batteries: Fundamentals and Applications“. In: *Redox - Principles and Advanced Applications*. InTech, Sep. 2017. ISBN: 9789535133940. DOI: 10.5772/intechopen.68752. URL: <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.68752>.
- [CHE24] Lin Chen, Mohammadreza Baghoolizadeh, Ali Basem, Sadek Habib Ali, Behrooz Ruhani, Abbas J. Sultan, Soheil Salahshour und As'ad Alizadeh. „A comprehensive review of a building-integrated photovoltaic system (BIPV)“. In: *International Communications in Heat and Mass Transfer* 159 (Dez. 2024), S. 108056. ISSN: 0735-1933. DOI: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2024.108056. URL: <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2024.108056> (besucht am 13. 08. 2025).
- [CHE25] You Chen, Dayao Li, Danqiu He, Yunfei Liu, Nooriati Taib und Christopher Heng Yii Sern. „Seasonal thermal performance of double and triple glazed windows with effects of window opening area“. In: *Scientific Reports* 15.1 (März 2025). ISSN: 2045-2322. DOI: 10.1038/s41598-025-92600-w. URL: <https://doi.org/10.1038/s41598-025-92600-w>.
- [CHO18] Hyun-Jung Choi, Jae-Sik Kang und Jung-Ho Huh. „A Study on Variation of Thermal Characteristics of Insulation Materials for Buildings According to Actual Long-Term Annual Aging Variation“. In: *International Journal of Thermophysics* 39.1 (2018). ISSN: 0195-928X. DOI:

- 10.1007/s10765-017-2318-3. URL: <https://doi.org/10.1007/s10765-017-2318-3> (besucht am 16. 10. 2023).
- [CLA01] Joe A. Clarke, Hrsg. Energy simulation in building design. 2. ed. Engineering village. Previous edition: Bristol : Hilger, 1985. - Includes bibliographical references and index. - Print version record. New York, NY: Elsevier Engineering Information [Online-Anbieter], 2001. 362 S. ISBN: 0750650826.
- [CLI22] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). „Summary for Policymakers“. In: Global Warming of 1.5°C: IPCC Special Report on Impacts of Global Warming of 1.5°C above Pre-industrial Levels in Context of Strengthening Response to Climate Change, Sustainable Development, and Efforts to Eradicate Poverty. Cambridge University Press, 2022, S. 1–24. DOI: 10.1017/9781009157940.001. URL: <https://doi.org/10.1017/9781009157940.001>.
- [CLU14] Johanna Cludius, Hauke Hermann, Felix Chr. Matthes und Verena Graichen. „The merit order effect of wind and photovoltaic electricity generation in Germany 2008–2016: Estimation and distributional implications“. In: Energy Economics 44 (Juli 2014), S. 302–313. ISSN: 0140-9883. DOI: 10.1016/j.eneco.2014.04.020. URL: <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2014.04.020>.
- [CON10] Antonio J. Conejo, Miguel Carrión und Juan M. Morales. Decision Making Under Uncertainty in Electricity Markets. Springer US, 2010. ISBN: 9781441974211. DOI: 10.1007/978-1-4419-7421-1.
- [CRA01] Drury B. Crawley, Linda K. Lawrie, Frederick C. Winkelmann, W.F. Buhl, Y. Joe Huang, Curtis O. Pedersen, Richard K. Strand, Richard J. Liesen, Daniel E. Fisher, Michael J. Witte und Jason Glazer. „EnergyPlus: creating a new-generation building energy simulation program“. In: Energy and Buildings 33.4 (Apr. 2001), S. 319–331. ISSN: 0378-7788. DOI: 10.1016/S0378-7788(00)00114-6. URL: [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(00\)00114-6](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(00)00114-6).
- [DAL20] Giorgia Dalla Santa, Antonio Galgaro, Raffaele Sassi, Matteo Cultrera, Paolo Scotton, Johannes Mueller, David Bertermann, Dimitrios Mendrinou, Riccardo Pasquali, Rodolfo Perego, Sebastian Pera, Eloisa Di Sipio, Giorgio Cassiani, Michele De Carli und Adriana Bernardi. „An updated ground thermal properties database for GSHP applications“. In: Geothermics 85 (Mai 2020), S. 101758. ISSN: 0375-6505. DOI: 10.1016/j.geothermics.2019.101758. URL: <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2019.101758>.

- [DAN24] L. Minh Dang, Le Quan Nguyen, Junyoung Nam, Tan N. Nguyen, Sujin Lee, Hyoung-Kyu Song und Hyeonjoon Moon. „Fifth generation district heating and cooling: A comprehensive survey“. In: *Energy Reports* 11 (Juni 2024), S. 1723–1741. ISSN: 2352-4847. DOI: 10.1016/j.egyr.2024.01.037. URL: <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2024.01.037>.
- [DE 22] Ishanki De Mel, Oleksiy V. Klymenko und Michael Short. *Discrete Optimal Designs for Distributed Energy Systems with Nonconvex Multi-phase Optimal Power Flow*. 2022. DOI: 10.48550/ARXIV.2209.14354. URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2209.14354> (besucht am 19.12.2024).
- [DEC22] Ute Dechantsreiter und Peter Horst. „Wiederverwendung von Bauteilen – Beitrag für Ressourceneffizienz und Klimaschutz“. In: *Wasser, Energie und Umwelt*. Springer Fachmedien Wiesbaden, 2022, S. 157–167. ISBN: 9783658356071. DOI: 10.1007/978-3-658-35607-1\_16. URL: [https://doi.org/10.1007/978-3-658-35607-1\\_16](https://doi.org/10.1007/978-3-658-35607-1_16).
- [DEC23] Michael G. Deceglie, Kevin Anderson, Daniel Fregosi, William B. Hobbs, Mark A. Mikofski, Marios Theristis und Bennet E. Meyers. „Perspective: Performance Loss Rate in Photovoltaic Systems“. In: *Solar RRL* 7.15 (Juni 2023). ISSN: 2367-198X. DOI: 10.1002/solr.202300196. URL: <https://doi.org/10.1002/solr.202300196> (besucht am 26.11.2024).
- [DEN21] dena. dena-Leitstudie Aufbruch Klimaneutralität. 2021. URL: <https://www.dena.de/newsroom/meldungen/dena-leitstudie-aufbruch-klimaneutralitaet/> (besucht am 23.06.2023).
- [DES19] Destatis. *Statistisches Jahrbuch Deutschland und Internationales*. 2019. ISBN: 978-3-8246-1086-0. URL: <https://www.destatis.de/DE/Themen/Querschnitt/Jahrbuch/statistisches-jahrbuch-2019-dl.pdf> (besucht am 14.03.2024).
- [DEU21] Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena). *Klimaneutrale Quartiere und Areale*. Abschlussbericht. Berlin: Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena), 2021. URL: [https://www.dena.de/fileadmin/dena/Publikationen/PDFs/2021/dena-Abschlussbericht\\_Klimaneutrale\\_Quartiere\\_und\\_Areale.pdf](https://www.dena.de/fileadmin/dena/Publikationen/PDFs/2021/dena-Abschlussbericht_Klimaneutrale_Quartiere_und_Areale.pdf).
- [DIN11] DIN. *DIN EN 1992-1-1:2011-01: Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken - Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau*; Deutsche Fassung. 2011. URL: <https://dx.doi.org/10.31030/1723945> (besucht am 25.11.2024).

- [DIN12] DIN. DIN EN 15978:2012-10: Nachhaltigkeit von Bauwerken - Bewertung der umweltbezogenen Qualität von Gebäuden - Berechnungsmethod. 2012. URL: <https://dx.doi.org/10.31030/1917049> (besucht am 26. 06. 2023).
- [DIN13] DIN. DIN 4108-2:2013-02: Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 2: Mindestanforderungen an den Wärmeschutz. 34 S. Berlin, Feb. 2013.
- [DIN17] DIN. DIN EN 16798-3:2017-11: Energetische Bewertung von Gebäuden – Lüftung von Gebäuden – Teil 3: Lüftung von Nichtwohngebäuden – Leistungsanforderungen an Lüftungs- und Klimaanlage und Raumkühlsysteme (Module M5-1, M5-4). Deutsche Fassung EN 16798-3:2017. Berlin, Nov. 2017.
- [DIN18a] DIN. DIN EN ISO 52000-1:2018-03: Energieeffizienz von Gebäuden - Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden - Teil 1: Allgemeiner Rahmen und Verfahren (ISO 52000-1:2017). 2018. URL: <https://dx.doi.org/10.31030/2577378>.
- [DIN18b] DIN. DIN EN ISO 52016-1:2018-04: Energetische Bewertung von Gebäuden - Energiebedarf für Heizung und Kühlung, Innentemperaturen sowie fühlbare und latente Heizlasten\_- Teil\_1: Berechnungsverfahren (ISO\_52016-1:2017); Deutsche Fassung EN\_ISO\_52016-1:2017: Energiebedarf für Heizung und Kühlung, Innentemperaturen sowie fühlbare und latente Heizlasten. Berlin, 2018. DOI: 10.31030/2577376. URL: <https://dx.doi.org/10.31030/2577376> (besucht am 22. 10. 2023).
- [DIN18c] DIN. DIN V 18599-10:2018-09, Energetische Bewertung von Gebäuden\_- Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung\_- Teil\_10: Nutzungsrandbedingungen, Klimadaten. Berlin, 2018. DOI: 10.31030/2874436. URL: <https://dx.doi.org/10.31030/2874436> (besucht am 25. 10. 2023).
- [DIN21a] DIN. DIN EN 17423:2020-02: Energieeffizienz von Gebäuden - Bestimmung und Angabe von Primärenergiefaktoren (PEF) und CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktoren - Allgemeine Grundsätze, Modul M1-7. 2021. URL: <https://www.dinmedia.de/de/norm/din-en-17423/327305815>.
- [DIN21b] DIN. DIN EN ISO 14040: 2021-02: Umweltmanagement: Ökobilanz - Grundsätze und Rahmenbedingungen. 2021. URL: <https://dx.doi.org/10.31030/3179655> (besucht am 23. 06. 2023).

- [DIN21c] DIN. DIN EN ISO 14044:2021-02: Umweltmanagement: Ökobilanz - Anforderungen und Anleitungen. 2021. URL: <https://dx.doi.org/10.31030/3179656> (besucht am 23.06.2023).
- [DIN24a] DIN. DIN EN 15804:2024-03: Nachhaltigkeit von Bauwerken - Umweltproduktdeklarationen - Grundregeln für die Produktkategorie Bauprodukte. 2024. URL: <https://dx.doi.org/10.31030/1967280> (besucht am 23.08.2024).
- [DIN24b] DIN. DIN EN 15978:2024-05: Nachhaltigkeit von Bauwerken - Bewertung der umweltbezogenen Qualität von Gebäuden - Berechnungsmethod. 2024. URL: <https://dx.doi.org/10.31030/1917049> (besucht am 26.06.2023).
- [DON22] Bing Dong, Romana Markovic, Salvatore Carlucci, Yapan Liu, Andreas Wagner, Antonio Liguori, Christoph van Treeck, Dmitry Oleynikov, Elie Azar, Gianmarco Fajilla, Ján Drgoňa, Joyce Kim, Marika Vellei, Marilena De Simone, Masood Shamsaiee, Mateus Bavaresco, Matteo Favero, Mikkel Kjaergaard, Mohamed Osman, Moritz Frahm, Sanam Dabirian, Da Yan und Xuyuan Kang. „A guideline to document occupant behavior models for advanced building controls“. In: *Building and Environment* 219 (Juli 2022), S. 109195. ISSN: 0360-1323. DOI: 10.1016/j.buildenv.2022.109195. URL: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109195>.
- [DUB97] Heinrich Dubbel, Beitz Wolfgang und Karl-Heinrich Grote. Taschenbuch für den Maschinenbau. 19., völlig neu bearb. Aufl. Literaturangaben. Berlin: Springer, 1997. ISBN: 3540624678.
- [DUN22] Marcus Dunst. Lüftungsanlagen in öffentlichen Gebäuden: Entscheidungshilfen für Bauherren. Springer Fachmedien Wiesbaden, 2022. ISBN: 9783658357528. DOI: 10.1007/978-3-658-35752-8. URL: <https://doi.org/10.1007/978-3-658-35752-8> (besucht am 07.05.2024).
- [DUR18] Elma Durmišević. „Reversible building design“. In: *Designing for the Circular Economy*. Routledge, Aug. 2018, S. 344–359. ISBN: 9781315113067. DOI: 10.4324/9781315113067-32. URL: <http://dx.doi.org/10.4324/9781315113067-32>.
- [DWD23] Deutscher Wetterdienst DWD. Testreferenzjahre (TRY). 2023. URL: <https://www.dwd.de/DE/leistungen/testreferenzjahre/testreferenzjahre.html> (besucht am 27.06.2023).
- [ECO23] ecoinvent. ecoinvent. 2023. URL: <https://ecoinvent.org/> (besucht am 27.06.2023).

- [EKR10] Orhan Ekren und Banu Y. Ekren. „Size optimization of a PV/wind hybrid energy conversion system with battery storage using simulated annealing“. In: *Applied Energy* 87.2 (Feb. 2010), S. 592–598. ISSN: 0306-2619. DOI: 10.1016/j.apenergy.2009.05.022. URL: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.05.022>.
- [ELE18] Georgios Eleftheriadis und Mohamed Hamdy. „The Impact of Insulation and HVAC Degradation on Overall Building Energy Performance: A Case Study“. In: *Buildings* 8.2 (Feb. 2018), S. 23. ISSN: 2075-5309. DOI: 10.3390/buildings8020023. URL: <https://doi.org/10.3390/buildings8020023>.
- [ELL24] Petros Ellinas, Samuel Chevalier und Spyros Chatzivasileiadis. A hybrid Quantum-Classical Algorithm for Mixed-Integer Optimization in Power Systems. 2024. DOI: 10.48550/ARXIV.2404.10693. URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2404.10693> (besucht am 19.12.2024).
- [ERL18] Berit Erlach, Hans-Martin Henning, Christoph Kost, Andreas Palzer und Cyril Stephanos. Optimierungsmodell REMod-D. Materialien zur Analyse »Sektorkopplung« – Untersuchungen und Überlegungen zur Entwicklung eines integrierten Energiesystems. Schriftenreihe Energiesysteme der Zukunft. Wissenschaftliche Koordination: Dr. Katharina Schätzler, KIT. München: acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften, 2018.
- [ESK87] Per Eskilson. „Thermal analysis of heat extraction boreholes“. English. Defence details Date: 1987-09-11 Time: 09:15 Place: Sektionen för teknisk fysik External reviewer(s) Name: [unknown], [unknown] Title: [unknown] Affiliation: [unknown] —. Doctoral Thesis (compilation). Department of Physics, 1987. ISBN: 91-7900-298-6.
- [EUR16] European Commission, Directorate-General for Energy. Review of the default primary energy factor (PEF) reflecting the estimated average EU generation efficiency – Annex IV of Directive 2012/27/EU. Techn. Ber. Standards-Study zur PEF-Festlegung. Europäische Kommission, 2016. URL: [https://energy.ec.europa.eu/publications/review-default-primary-energy-factor-pef-reflecting-estimated-average-eu-generation-efficiency\\_en](https://energy.ec.europa.eu/publications/review-default-primary-energy-factor-pef-reflecting-estimated-average-eu-generation-efficiency_en).
- [EUR22] EUCO European Council. Fit für 55. Juni 2022. URL: <https://www.consilium.europa.eu/de/policies/fit-for-55/>.
- [EUR24] European Union. Directive (EU) 2024/1275 of the European Parliament and of the Council of 24 April 2024 on the energy performance of buildings (recast). Official Journal of the European Union, L 202,

- 5.7.2024, p. 1–107. 2024. URL: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2024/1275/oj>.
- [FAB23] Solar Fabrik. Willkommen bei der Solar Fabrik. Hrsg. von Solar Fabrik GmbH. 2023. URL: <https://www.solar-fabrik.de/> (besucht am 23. 11. 2023).
- [FEL20] Clemens Felsmann, Alf Perschk und Richard Franke. „Test Of ISO 52016-1 Energy Performance Of Buildings Calculation Procedure“. In: Proceedings of Building Simulation 2019: 16th Conference of IBPSA. Hrsg. von Vincenzo Corrado, Enrico Fabrizio, Andrea Gasparella und Francesco Patuzzi. Building Simulation Conference Proceedings. IBPSA, 2020, S. 3910–3916. DOI: 10.26868/25222708.2019.210720. URL: <https://doi.org/10.26868/25222708.2019.210720> (besucht am 25. 10. 2023).
- [FLO95] Christodoulos A. Floudas. Nonlinear and Mixed-Integer Optimization: Fundamentals and Applications. Oxford University Press, Nov. 1995. ISBN: 9780197560945. DOI: 10.1093/oso/9780195100563.001.0001. URL: <https://doi.org/10.1093/oso/9780195100563.001.0001>.
- [FON23] Stefano Fonseca. Die 15 größten Solarhersteller aus Deutschland. 2023. URL: <https://gruenes.haus/photovoltaik-hersteller-deutschland/> (besucht am 23. 11. 2023).
- [FON25] Stefano Fonseca. Solarmodule mit dem höchsten Wirkungsgrad im Vergleich (2025). Apr. 2025. URL: <https://gruenes.haus/wirkungsgrad-solarzelle-photovoltaik>.
- [FRA22a] Ryan M. France, John F. Geisz, Tao Song, Waldo Olavarria, Michelle Young, Alan Kibbler und Myles A. Steiner. „Triple-junction solar cells with 39.5% terrestrial and 34.2% space efficiency enabled by thick quantum well superlattices“. In: Joule 6.5 (Mai 2022), S. 1121–1135. ISSN: 2542-4351. DOI: 10.1016/j.joule.2022.04.024. URL: <https://doi.org/10.1016/j.joule.2022.04.024>.
- [FRA22b] Yvonne Franz und Anke Strüver. Stadtgeographie: Aktuelle Themen und Ansätze. Springer Berlin Heidelberg, 2022. ISBN: 9783662653821. DOI: 10.1007/978-3-662-65382-1. URL: <https://doi.org/10.1007/978-3-662-65382-1> (besucht am 20. 12. 2024).
- [GEH02] Signhild Gehlin. „Thermal response test : method development and evaluation“. Godkänd; 2002; 20061110 (haneit). Diss. Luleå University of Technology, 2002, S. 44. URL: <https://www.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2:991442>.

- [GEO17] Laurent Georges, Tomasz Iwanek und Martin Thalfeldt. „Energy Efficiency of Hydronic Space-Heating Distribution Systems in Super-Insulated Residential Buildings“. In: Proceedings of Building Simulation 2017: 15th Conference of IBPSA. BS 2017. IBPSA, Aug. 2017. DOI: 10.26868/25222708.2017.421. URL: <https://doi.org/10.26868/25222708.2017.421>.
- [GEO24] Bundesverband e.V. Geothermie. Entzugsleistung. 2024. URL: <https://www.geothermie.de/bibliothek/lexikon-der-geothermie/e/entzugsleistung> (besucht am 28.03.2024).
- [GJO23] Kristian Gjoka, Behzad Rismanchi und Robert H. Crawford. „Fifth-generation district heating and cooling systems: A review of recent advancements and implementation barriers“. In: Renewable and Sustainable Energy Reviews 171 (Jan. 2023), S. 112997. ISSN: 1364-0321. DOI: 10.1016/j.rser.2022.112997. URL: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112997>.
- [GLA22] Nicolas Glaesmann. Wärmepumpenheizungen: Planungshilfe und Ratgeber für Neubauten und Bestandsgebäude. Springer Fachmedien Wiesbaden, 2022. ISBN: 9783658390310. DOI: 10.1007/978-3-658-39031-0. URL: <https://doi.org/10.1007/978-3-658-39031-0> (besucht am 19.03.2024).
- [GOE21] Johannes Goeke. „Physikalische Grundlagen thermischer Speicher“. In: Thermische Energiespeicher in der Gebäudetechnik. Springer Fachmedien Wiesbaden, 2021, S. 27–57. ISBN: 9783658345105. DOI: 10.1007/978-3-658-34510-5\_2. URL: [https://doi.org/10.1007/978-3-658-34510-5\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-658-34510-5_2).
- [GRE24a] Green Delta. LCA data. 2024. URL: <https://www.openlca.org/lca-data/> (besucht am 24.09.2024).
- [GRE24b] GmbH Green Solar. Wirkungsgrad von Solarzellen: Balkonkraftwerk und Photovoltaik 2024. 2024. URL: <https://greensolar.at/2024/11/14/wirkungsgrad-von-solarzellen>.
- [GRI08] B. Griffith, N. Long, P. Torcellini, R. Judkoff, D. Crawley und J. Ryan. Methodology for Modeling Building Energy Performance across the Commercial Sector. 2008. URL: <https://research-hub.nrel.gov/en/publications/methodology-for-modeling-building-energy-performance-across-the-c> (besucht am 30.04.2024).
- [GRO99] Ignacio E. Grossmann, Jose Antonio Caballero und Hector Yeomans. „Mathematical programming approaches to the synthesis of chemical process systems“. In: Korean Journal of Chemical Enginee-

- ring 16.4 (Juli 1999), S. 407–426. ISSN: 1975-7220. DOI: 10.1007/bf02698263. URL: <https://doi.org/10.1007/BF02698263>.
- [GRO24] Jan Grossarth. „Nachhaltigkeit und Lebenszyklusbetrachtung im Bauwesen“. In: *Bioökonomie und Zirkulärwirtschaft im Bauwesen*. Springer Fachmedien Wiesbaden, 2024, S. 217–266. ISBN: 9783658401986. DOI: 10.1007/978-3-658-40198-6\_7. URL: [https://doi.org/10.1007/978-3-658-40198-6\\_7](https://doi.org/10.1007/978-3-658-40198-6_7).
- [GRU22] John Grunewald, Andreas Nicolai, Stephan Hirth, Dirk Weiß, Christoph van Treeck, Jérôme Frisch, Amin Nouri, Christoph Emunds, Madjid Madjidi, Julian Agudelo, Iris Reichenbach, Rainer Rolffs, Rainer Strobel, Rui Tang und Falko Höppchen. ENOB: SimQuality - Entwicklung von Qualitätsstandards für die energetische Gebäude- und Quartierssimulation als Planungswerkzeug. Schlussbericht. Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz, PtJ Projektträger Jülich, Forschungszentrum Jülich, 2022. URL: <https://edocs.tib.eu/files/e01fb23/1859246915.pdf>.
- [GRY13] Steinar Grynning, Arild Gustavsen, Berit Time und Bjørn Petter Jelle. „Windows in the buildings of tomorrow: Energy losers or energy gainers?“ In: *Energy and Buildings* 61 (Juni 2013), S. 185–192. ISSN: 0378-7788. DOI: 10.1016/j.enbuild.2013.02.029. URL: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.02.029>.
- [GUA24] The Guardian. ‘Crunch time for real’: UN says time for climate delays has run out. Okt. 2024. URL: <https://www.theguardian.com/environment/2024/oct/24/crunch-time-for-real-un-says-time-for-climate-delays-has-run-out>.
- [GUE11] Olivia Guerra Santin. „Behavioural Patterns and User Profiles related to energy consumption for heating“. In: *Energy and Buildings* 43.10 (Okt. 2011), S. 2662–2672. ISSN: 0378-7788. DOI: 10.1016/j.enbuild.2011.06.024. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.06.024>.
- [GUN24] Patricia Gunderson, Edward Louie und Katherine Cort. „Laboratory and field validation of the performance benefits and costs of thin triple-pane windows in residential buildings“. In: *Science and Technology for the Built Environment* 30.7 (Aug. 2024), S. 767–784. ISSN: 2374-474X. DOI: 10.1080/23744731.2024.2357529. URL: <https://doi.org/10.1080/23744731.2024.2357529>.
- [GUR25] LLC. Gurobi Optimization. GUROBI. 2025. URL: <https://www.gurobi.com/>.

- [HAD05] Jean-Christophe Hadorn, Hrsg. Thermal energy storage for solar and low energy buildings. State of the art. IEA solar heating & cooling programme. Literaturangaben. [Genf]: IEA, 2005. 170 S. ISBN: 848409877X.
- [HAF17] Annette Hafner und Sabrina Schäfer. „Comparative LCA study of different timber and mineral buildings and calculation method for substitution factors on building level“. In: Journal of Cleaner Production 167 (Nov. 2017), S. 630–642. ISSN: 0959-6526. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.08.203. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.08.203>.
- [HAN22] Yongming Han, Xiaoyi Lou, Mingfei Feng, Zhiqiang Geng, Liangchao Chen, Weiyang Ping und Gang Lu. „Energy consumption analysis and saving of buildings based on static and dynamic input-output models“. In: Energy 239 (Jan. 2022), S. 122240. ISSN: 0360-5442. DOI: 10.1016/j.energy.2021.122240. URL: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122240>.
- [HAU14] Gerhard Hausladen, Thomas Auer, Jakob Schneegans, Klaus Klimke, Hana Riemer, Barbara Trojer, Linna Qian und Manuel de Borja Torrejón. Lastverhalten von Gebäuden unter Berücksichtigung unterschiedlicher Bauweisen und technischer Systeme: Speicher- und Lastmanagementpotenziale in Gebäuden. Forschungsbericht. Gefördert durch die Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung (AktENZEICHEN: II 3-F20-11-1-047 / SWD-10.08.18.7-12.47). München: Technische Universität München, Lehrstuhl für Bauklimatik und Haustechnik, Juni 2014.
- [HE22] Yi He, Su Guo, Jianxu Zhou, Jilei Ye, Jing Huang, Kun Zheng und Xinru Du. „Multi-objective planning-operation co-optimization of renewable energy system with hybrid energy storages“. In: Renewable Energy 184 (Jan. 2022), S. 776–790. ISSN: 0960-1481. DOI: 10.1016/j.renene.2021.11.116. URL: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.11.116>.
- [HEG02] Adel A. Hegazy und M.R. Diab. „Performance of an improved design for storage-type domestic electrical water-heaters“. In: Applied Energy 71.4 (Apr. 2002), S. 287–306. ISSN: 0306-2619. DOI: 10.1016/S0306-2619(02)00006-5. URL: [https://doi.org/10.1016/S0306-2619\(02\)00006-5](https://doi.org/10.1016/S0306-2619(02)00006-5).
- [HEI24] e.K. heinl bauelemente. Sandwichplatten & Sandwichpaneele. 2024. URL: <https://www.heinl-bauelemente.de/sandwichplatten/> (besucht am 11. 10. 2024).

- [HEL06] J.C. Helton, J.D. Johnson, C.J. Sallaberry und C.B. Storlie. „Survey of sampling-based methods for uncertainty and sensitivity analysis“. In: *Reliability Engineering ; System Safety* 91.10–11 (Okt. 2006), S. 1175–1209. ISSN: 0951-8320. DOI: 10.1016/j.ress.2005.11.017. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ress.2005.11.017>.
- [HEL91] Göran Hellström. „Ground heat storage : thermal analyses of duct storage systems“. English. Defence details Date: 1991-05-24 Time: 13:15 Place: Sektionen för teknisk fysik External reviewer(s) Name: [unknown], [unknown] Title: [unknown] Affiliation: [unknown] — The information about affiliations in this record was updated in December 2015. The record was previously connected to the following departments: Mathematical Physics (Faculty of Technology) (011040002), Department of Physics (011013000). Doctoral Thesis (monograph). Mathematical Physics, 1991. ISBN: 91-628-0290-9.
- [HES15] Arefeh Hesaraki, Sture Holmberg und Fariborz Haghghat. „Seasonal thermal energy storage with heat pumps and low temperatures in building projects—A comparative review“. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 43 (März 2015), S. 1199–1213. ISSN: 1364-0321. DOI: 10.1016/j.rser.2014.12.002. URL: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.12.002> (besucht am 13. 08. 2025).
- [HEY20] Arsalan Heydarian, Claire McIlvennie, Laura Arpan, Siavash Yousefi, Marc Syndicus, Marcel Schweiker, Farrokh Jazizadeh, Romina Risetto, Anna Laura Pisello, Cristina Piselli, Christiane Berger, Zhuxuan Yan und Ardeshir Mahdavi. „What drives our behaviors in buildings? A review on occupant interactions with building systems from the lens of behavioral theories“. In: *Building and Environment* 179 (Juli 2020), S. 106928. ISSN: 0360-1323. DOI: 10.1016/j.buildenv.2020.106928. URL: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.106928>.
- [HOE09] P. Hoes, J.L.M. Hensen, M.G.L.C. Loomans, B. de Vries und D. Bourgeois. „User behavior in whole building simulation“. In: *Energy and Buildings* 41.3 (März 2009), S. 295–302. ISSN: 0378-7788. DOI: 10.1016/j.enbuild.2008.09.008. URL: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2008.09.008>.
- [HOF20] Maximilian Hoffmann, Leander Kotzur, Detlef Stolten und Martin Robinus. „A Review on Time Series Aggregation Methods for Energy System Models“. In: *Energies* 13.3 (Feb. 2020), S. 641. ISSN: 1996-1073. DOI: 10.3390/en13030641. URL: <https://doi.org/10.3390/en13030641> (besucht am 08.02.2024).

- [HOF21] Maximilian Hoffmann, Jan Priesmann, Lars Nolting, Aaron Praktiknjo, Leander Kotzur und Detlef Stolten. „Typical periods or typical time steps? A multi-model analysis to determine the optimal temporal aggregation for energy system models“. In: *Applied Energy* 304 (Dez. 2021), S. 117825. ISSN: 0306-2619. DOI: 10.1016/j.apenergy.2021.117825. URL: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117825> (besucht am 08. 02. 2024).
- [HOF24] Maximilian Hoffmann, Bruno U. Schyska, Julian Bartels, Tristan Pelsler, Johannes Behrens, Manuel Wetzler, Hans Christian Gils, Chuen-Fung Tang, Marius Tillmanns, Jan Stock, André Xhonneux, Leander Kotzur, Aaron Praktiknjo, Thomas Vogt, Patrick Jochem, Jochen Linßen, Jann M. Weinand und Detlef Stolten. „A review of mixed-integer linear formulations for framework-based energy system models“. In: *Advances in Applied Energy* 16 (Dez. 2024), S. 100190. ISSN: 2666-7924. DOI: 10.1016/j.adapen.2024.100190. URL: <https://doi.org/10.1016/j.adapen.2024.100190>.
- [HOL18] William F. Holmgren, Clifford W. Hansen und Mark A. Mikofski. „pvlib python: a python package for modeling solar energy systems“. In: *Journal of Open Source Software* 3.29 (2018), S. 884. DOI: 10.21105/joss.00884. URL: <https://doi.org/10.21105/joss.00884> (besucht am 30. 10. 2023).
- [HOL23] Ralf Hollstein. *Optimierungsmethoden. Einführung in Die Klassischen, Naturanalogen und Neuronalen Optimierungen*. 1st ed. Description based on publisher supplied metadata and other sources. Wiesbaden: Springer Vieweg. in Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 2023. 1412 S. ISBN: 9783658398552. URL: <https://doi.org/10.1007/978-3-658-39855-2> (besucht am 02. 12. 2024).
- [HOS24] Haidar Hosamo, Guilherme B.A. Coelho, Elsa Buvik, Sarra Drissi und Dimitrios Kraniotis. „Building sustainability through a novel exploration of dynamic LCA uncertainty: Overview and state of the art“. In: *Building and Environment* 264 (Okt. 2024), S. 111922. ISSN: 0360-1323. DOI: 10.1016/j.buildenv.2024.111922. URL: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.111922>.
- [HUA19] Shifang Huang, Wangda Zuo, Huixia Lu, Caihua Liang und Xiaosong Zhang. „Performance comparison of a heating tower heat pump and an air-source heat pump: A comprehensive modeling and simulation study“. In: *Energy Conversion and Management* 180 (Jan. 2019), S. 1039–1054. ISSN: 0196-8904. DOI: 10.1016/j.enconman.2018.11.050. URL: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.11.050> (besucht am 19. 03. 2024).

- [IEA21] IEA. Report IEA-PVPS T13-22:2021:Assessment of Performance Loss Rate of PV Power Systems. 2021. URL: [https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2021/04/IEA-PVPS-T13-22\\_2021-Assessment-of-Performance-Loss-Rate-of-PV-Power-Systems-report.pdf](https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2021/04/IEA-PVPS-T13-22_2021-Assessment-of-Performance-Loss-Rate-of-PV-Power-Systems-report.pdf) (besucht am 26. 11. 2024).
- [IER24] Institute of Energy and Climate Research IER. tsam - Time Series Aggregation Module. 2024. URL: <https://github.com/FZJ-IEK3-VSA/tsam> (besucht am 08. 02. 2024).
- [IPC22] IPCC. Climate change 2022. Mitigation of climate change. Hrsg. von P. R. Shukla, Jim Skea und Andreas Reinhard Reisinger. [Geneva]: [IPCC], 2022. 11977 S. ISBN: 9789291691609.
- [IPC23] IPCC. The Intergovernmental Panel on Climate Change. 2023. URL: <https://www.ipcc.ch/> (besucht am 27. 06. 2023).
- [ITT12] René Itten, Rolf Frischknecht und Matthias Stucki. Life Cycle Inventories of Electricity Mixes and Grid - Version 1.3. 2012. URL: [https://treeze.ch/fileadmin/user\\_upload/downloads/Publications/Case\\_Studies/Energy/itten-2014-electricity-mix-v1.3.pdf](https://treeze.ch/fileadmin/user_upload/downloads/Publications/Case_Studies/Energy/itten-2014-electricity-mix-v1.3.pdf) (besucht am 24. 10. 2024).
- [JAB16] Josef Jablonský. „Benchmarks for Current Linear and Mixed Integer Optimization Solvers“. In: Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis 63.6 (Jan. 2016), S. 1923–1928. ISSN: 2464-8310. DOI: 10.11118/actaun201563061923. URL: <http://dx.doi.org/10.11118/actaun201563061923>.
- [JAC24] Anna Jacobson, Filippo Pecci, Nestor Sepulveda, Qingyu Xu und Jesse Jenkins. „A Computationally Efficient Benders Decomposition for Energy Systems Planning Problems with Detailed Operations and Time-Coupling Constraints“. In: INFORMS Journal on Optimization 6.1 (Jan. 2024), S. 32–45. ISSN: 2575-1492. DOI: 10.1287/ijoo.2023.0005. URL: <https://doi.org/10.1287/ijoo.2023.0005> (besucht am 19. 12. 2024).
- [JAV11] S. Javed und J. Claesson. „New analytical and numerical solutions for the short-term analysis of vertical ground heat exchangers“. In: ASHRAE Transactions 117.1 (2011), S. 3–12.
- [JEN15] Mareike Jentsch. „Potenziale von Power-to-Gas Energiespeichern“. Dissertation. Kassel: Universität Kassel, 2015. URL: <https://kobra.uni-kassel.de/handle/123456789/201503244869>.

- [JIA22] Mengting Jiang, Camilo Rindt und David M. J. Smeulders. „Optimal Planning of Future District Heating Systems—A Review“. In: *Energies* 15.19 (Sep. 2022), S. 7160. ISSN: 1996-1073. DOI: 10.3390/en15197160.
- [JOU23] Hussam Jouhara, Nerea Nieto, Bakartxo Egilegor, Josu Zuazua, Eva González, Ignacio Yebra, Alfredo Igesias, Bertrand Delpech, Sulaiman Almahmoud, Daniel Brough, Jurgita Malinauskaite, Antonis Vlasopoulos, Mark Hill und Brian Axcell. „Waste heat recovery solution based on a heat pipe heat exchanger for the aluminium die casting industry“. In: *Energy* 266 (März 2023), S. 126459. ISSN: 0360-5442. DOI: 10.1016/j.energy.2022.126459. URL: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.126459>.
- [JUN24] R. Junga, J. Pospolita, M. Kabaciński, S. Sobek, R. Stanisławski, M.A. Mami, R. Balicz und Z. Mruk. „Numerical modeling of heat losses from hot water storage tank“. In: *Case Studies in Thermal Engineering* 62 (Okt. 2024), S. 105146. ISSN: 2214-157X. DOI: 10.1016/j.csite.2024.105146. URL: <https://doi.org/10.1016/j.csite.2024.105146> (besucht am 13.08.2025).
- [JÜR25] Patrick Jürgens, Markus Kaiser, Charlotte Senkpiel, Connor Thelen, Christoph Kost und Hans-Martin Henning. „Closing the ambition gap: Germany’s energy transition in line with a 1.5°C carbon budget“. In: *Climate Policy* (2025). DOI: 10.1080/14693062.2025.2506610. URL: <https://doi.org/10.1080/14693062.2025.2506610>.
- [KIM19] Seok-Hyun Kim, Hakgeun Jeong und Soo Cho. „A Study on Changes of Window Thermal Performance by Analysis of Physical Test Results in Korea“. In: *Energies* 12.20 (Okt. 2019), S. 3822. ISSN: 1996-1073. DOI: 10.3390/en12203822. URL: <https://doi.org/10.3390/en12203822>.
- [KIM06] Kyung-Hwan Kim. „Study on the Performance Testing of the Closed Ice Thermal Energy Storage System using Screw Capsules“. In: *Journal of the Korean Solar Energy Society* 26.4 (2006). Discharging efficiency reported as 96.2%, S. 39–46. URL: <https://www.kci.go.kr/kciportal/ci/sereArticleSearch/ciSereArtiView.kci?sereArticleSearchBean.artiId=ART001035645> (besucht am 13.08.2025).
- [KIN24] Kingspan. Isolierte Dach- und Wandsysteme. 2024. URL: <https://www.kingspan.com/de/de/produkte/isolierte-dach-und-wandsysteme/> (besucht am 11.10.2024).

- [KIS22] Benedek Kiss und Zsuzsa Szalay. „Sensitivity of buildings’ carbon footprint to electricity decarbonization: a life cycle-based multi-objective optimization approach“. In: *The International Journal of Life Cycle Assessment* 28.7 (Apr. 2022), S. 933–952. ISSN: 1614-7502. DOI: 10.1007/s11367-022-02043-y. URL: <https://doi.org/10.1007/s11367-022-02043-y>.
- [KLE18] Andreas Kleiner und Günther Kasperek. „Thermophysikalische Stoffwerte von Kälte- und Wärmedämmstoffen“. In: *Handbuch Vakuumtechnik*. Springer Fachmedien Wiesbaden, 2018, S. 1–7. ISBN: 9783658134037. DOI: 10.1007/978-3-662-52991-1\_32-1. URL: [https://doi.org/10.1007/978-3-662-52991-1\\_32-1](https://doi.org/10.1007/978-3-662-52991-1_32-1).
- [KLE23] Mara Marthe Kleiner, Philipp Litz, Fabian Hein und Katharina Hartz. *Agorameter*. 2023. URL: <https://www.agora-energiewende.de/daten-tools/agorameter/> (besucht am 04. 04. 2024).
- [KLI23] Klingenburg GmbH. Gegenstrom-Plattenwärmetauscher Typ GS: Hocheffizient – aus Aluminium, PET oder mit Epoxy Beschichtung. 2023. URL: [http://www.klingenburg.de/fileadmin/user\\_upload/germany/Downloads/GS/klingenburg\\_gs\\_de.pdf](http://www.klingenburg.de/fileadmin/user_upload/germany/Downloads/GS/klingenburg_gs_de.pdf) (besucht am 22. 10. 2023).
- [KNA23] Florian Knappe, Nadine Muchow, Rüdiger Oetjen-Dehne, Nadine Buschow und Felix Kaiser. Erarbeitung von Grundlagen für die Evaluierung der Gewerbeabfallverordnung – Abschlussbericht (Texte 47/2023). UBA-Texte 47/2023. Im Auftrag des Umweltbundesamtes, Abschlussbericht, 147 S. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt, März 2023. URL: [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/texte\\_47-2023\\_erarbeitung\\_von\\_grundlagen\\_fuer\\_die\\_evaluierung\\_der\\_gewerbeabfallverordnung.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/texte_47-2023_erarbeitung_von_grundlagen_fuer_die_evaluierung_der_gewerbeabfallverordnung.pdf).
- [KOR25] Marios Kordilas, Dejan Mumovic, Yair Schwartz, Rob Cooke und Smith Mordak. „The impact of evolving mix on building’s life cycle environmental impacts under climate change: insights from a London office case study“. In: *The International Journal of Life Cycle Assessment* (Juni 2025). ISSN: 1614-7502. DOI: 10.1007/s11367-025-02493-0. URL: <https://doi.org/10.1007/s11367-025-02493-0>.
- [KOS20] Daniel Koschwitz. „Autoadaptives prädiktives Modell zur Quantifizierung von Gleichzeitigkeitseffekten in Lastverteilungen urbaner Energiesysteme“. de. Diss. RWTH Aachen, 2020, S. 2020. DOI: 10.18154/RWTH-2020-01982. URL: <https://doi.org/10.18154/RWTH-2020-01982>.

- [KOT18a] Leander Kotzur, Peter Markewitz, Martin Robinius und Detlef Stolten. „Impact of different time series aggregation methods on optimal energy system design“. In: *Renewable Energy* 117 (März 2018), S. 474–487. ISSN: 0960-1481. DOI: 10.1016/j.renene.2017.10.017. URL: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.10.017> (besucht am 08.02.2024).
- [KOT18b] Leander Kotzur, Peter Markewitz, Martin Robinius und Detlef Stolten. „Time series aggregation for energy system design: Modeling seasonal storage“. In: *Applied Energy* 213 (März 2018), S. 123–135. ISSN: 0306-2619. DOI: 10.1016/j.apenergy.2018.01.023. URL: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.01.023> (besucht am 30.11.2024).
- [KOT23] Christopher Kotsakis. „Ordinary Least Squares“. In: *Encyclopedia of Mathematical Geosciences*. Springer International Publishing, 2023, S. 1032–1038. ISBN: 9783030850401. DOI: 10.1007/978-3-030-85040-1\_237.
- [KUE20] Lucas Elias Kuepper, Holger Teichgräber und Adam R. Brandt. „CapacityExpansion: A capacity expansion modeling framework in Julia“. In: *Journal of Open Source Software* 5.52 (2020), S. 2034. DOI: 10.21105/joss.02034. URL: <https://doi.org/10.21105/joss.02034>.
- [KUH21] Tilmann E. Kuhn, Christof Erban, Martin Heinrich, Johannes Eisenlohr, Frank Ensslen und Dirk Holger Neuhaus. „Review of technological design options for building integrated photovoltaics (BIPV)“. In: *Energy and Buildings* 231 (Jan. 2021), S. 110381. ISSN: 0378-7788. DOI: 10.1016/j.enbuild.2020.110381. URL: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110381> (besucht am 13.08.2025).
- [KUR23] Jibi Kurian und Lathi Karthi. „Building integrated photovoltaics-an overview“. In: *Sustainability, Agri, Food and Environmental Research-DISCONTINUED* 10 (Jan. 2023). ISSN: 0719-3726. DOI: 10.7770/safer-v10n1-art2495. URL: <http://dx.doi.org/10.7770/safer-v10n1-art2495> (besucht am 13.08.2025).
- [LAN10] Jörg Lange und Klaus Berner. „Sandwichelemente im Hochbau“. In: *Stahlbau-Kalender 2010*. John Wiley & Sons, Ltd, 2010. Kap. 6, S. 643–699. ISBN: 9783433600498. DOI: 10.1002/9783433600498.ch6. eprint: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/9783433600498.ch6>. URL: <https://doi.org/10.1002/9783433600498.ch6>.
- [LI22] Xiaojun Li und Alan Palazzolo. „A review of flywheel energy storage systems: state of the art and opportunities“. In: *Journal of Energy Storage* 46 (Feb. 2022), S. 103576. ISSN: 2352-152X. DOI: 10.1016/j.est.2021.103576. URL: <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.103576>.

- [LIN22] Sascha Lindig, Marios Theristis und David Moser. „Best practices for photovoltaic performance loss rate calculations“. In: *Progress in Energy* 4.2 (Apr. 2022), S. 022003. ISSN: 2516-1083. DOI: 10.1088/2516-1083/ac655f. URL: <https://doi.org/10.1088/2516-1083/ac655f> (besucht am 26. 11. 2024).
- [LON25] LONGi. LONGi sets new world record for crystalline silicon-perovskite tandem solar cell efficiency. Two-terminal crystalline silicon-perovskite tandem solar cell achieved 34.85 % efficiency, certified by NREL. Apr. 2025. URL: <https://www.pv-tech.org/industry-updates/longi-sets-new-world-record-for-crystalline-silicon-perovskite-tandem-solar-cell-efficiency/> (besucht am 13.08. 2025).
- [LOP24] Jason Loprete, Rebecca Trojanowski, Thomas Butcher, Jon Longtin und Dimitris Assanis. „Enabling residential heating decarbonization through hydronic low-temperature thermal distribution using forced-air assistive devices“. In: *Applied Energy* 353 (Jan. 2024), S. 122031. ISSN: 0306-2619. DOI: 10.1016/j.apenergy.2023.122031. URL: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.122031>.
- [LOU22] Yingli Lou, Yunyang Ye, Yizhi Yang und Wangda Zuo. „Long-term carbon emission reduction potential of building retrofits with dynamically changing electricity emission factors“. In: *Building and Environment* 210 (Feb. 2022), S. 108683. ISSN: 0360-1323. DOI: 10.1016/j.buildenv.2021.108683. URL: <https://www.doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108683>.
- [LU23] Jiaqi Lu, Jing Tang, Rui Shan, Guanghui Li, Pinhua Rao und Nan Zhang. „Spatiotemporal analysis of the future carbon footprint of solar electricity in the United States by a dynamic life cycle assessment“. In: *iScience* 26.3 (März 2023), S. 106188. ISSN: 2589-0042. DOI: 10.1016/j.isci.2023.106188. URL: <https://doi.org/10.1016/j.isci.2023.106188>.
- [LUD21] Gunnar Luderer, Christoph Kost und Dominika Sörgel. Deutschland auf dem Weg zur Klimaneutralität 2045 - Szenarien und Pfade im Modellvergleich. 2021. DOI: 10.48485/pik.2021.006. URL: <https://doi.org/10.48485/pik.2021.006> (besucht am 23.06. 2023).
- [LUN14] Henrik Lund, Sven Werner, Robin Wiltshire, Svend Svendsen, Jan Eric Thorsen, Frede Hvelplund und Brian Vad Mathiesen. „4th Generation District Heating (4GDH)“. In: *Energy* 68 (Apr. 2014), S. 1–11. ISSN: 0360-5442. DOI: 10.1016/j.energy.2014.02.089. URL: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.02.089>.

- [MAA21] Jalomi Maayan Tardif, Vasco Medici und Pierryves Padey. „Dynamic life cycle assessment of electricity demand of buildings with storage systems – potential for environmental impact mitigation“. In: Proceedings of Building Simulation 2021: 17th Conference of IBPSA. BS 2021. KU Leuven, Sep. 2021. DOI: 10.26868/25222708.2021.30144. URL: <https://doi.org/10.26868/25222708.2021.30144>.
- [MAN24a] Sepanta Mandegarian, Mehdi Hojjati und Hassan Moghaddar. „Recycled PET foam core sandwich panels with reinforced hybrid composite facesheets: A sustainable approach for enhanced impact resistance“. In: Journal of Sandwich Structures & Materials 27.2 (Okt. 2024), S. 396–428. ISSN: 1530-7972. DOI: 10.1177 / 10996362241298164. URL: <https://doi.org/10.1177/10996362241298164>.
- [MAN24b] Sanyogita Manu, Tobias Maria Burgholz, Fatemeh Nabilou, Kai Rewitz, Mahmoud El-Mokadem, Manuj Yadav, Giorgia Chinazzo, Riccardo Forgiarini Rupp, Elie Azar, Marc Syndicus, Abdul-Manan Sadiq, Marcel Schweiker, Sarah Crosby, Meng Kong, Donna Vakalis, Adam Rysanek, Dirk Müller, Janina Fels, Christoph van Treeck, Jérôme Frisch und Rania Christoforou. „A state-of-the-art, systematic review of indoor environmental quality studies in work-from-home settings“. In: Building and Environment 259 (Juli 2024), S. 111652. ISSN: 0360-1323. DOI: 10.1016/j.buildenv.2024.111652. URL: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.111652>.
- [MAR18] Nuria Martín-Chivelet, Juan Carlos Gutiérrez, Miguel Alonso-Abella, Faustino Chenlo und José Cuenca. „Building Retrofit with Photovoltaics: Construction and Performance of a BIPV Ventilated Façade“. In: Energies 11.7 (Juli 2018), S. 1719. ISSN: 1996-1073. DOI: 10.3390/en11071719. URL: <https://doi.org/10.3390/en11071719> (besucht am 13.08.2025).
- [MAR21] Dashamir Marini, Richard A. Buswell und Christina J. Hopfe. „Development of a dynamic analytical model for estimating waste heat from domestic hot water systems“. In: Energy and Buildings 247 (Sep. 2021), S. 111119. ISSN: 0378-7788. DOI: 10.1016/j.enbuild.2021.111119. URL: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111119> (besucht am 13.08.2025).
- [MAR20] Romana Markovic. „Generic occupant behavior modeling for commercial buildings“. en. Diss. 2020, S. 2020. DOI: 10.18154/RWTH-2020-08443. URL: <https://doi.org/10.18154/RWTH-2020-08443>.

- [MAT22] H. Damon Matthews und Seth Wynes. „Current global efforts are insufficient to limit warming to 1.5°C“. In: *Science* 376.6600 (Juni 2022), S. 1404–1409. ISSN: 1095-9203. DOI: 10.1126 / science. abo3378. URL: <https://doi.org/10.1126/science.abo3378>.
- [MCC05] Andrew McCulloch. „Sensitivity Analysis in Practice: A Guide to Assessing Scientific Models“. In: *Journal of the Royal Statistical Society Series A: Statistics in Society* 168.2 (März 2005), S. 466–466. ISSN: 1467-985X. DOI: 10.1111/j.1467-985x.2005.358\_16.x. URL: [https://doi.org/10.1111/j.1467-985x.2005.358\\_16.x](https://doi.org/10.1111/j.1467-985x.2005.358_16.x).
- [MET23] Meteotest, AG. *Meteonorm Software*. 2023. URL: <https://meteonorm.com/> (besucht am 27.06.2023).
- [MIC19] Pavol Micko, Andrej Kapjor, Marián Pafčuga und Dávid Hečko. „Comparison of radiator and floor heating in terms of comfort environment“. In: *38TH MEETING OF DEPARTMENTS OF FLUID MECHANICS AND THERMODYNAMICS*. Bd. 2118. AIP Publishing, 2019, S. 030031. DOI: 10.1063/1.5114759. URL: <http://dx.doi.org/10.1063/1.5114759>.
- [MIK24] Daniel Mark Mikkelsen, Sunming Qin und Jun Soo Yoo. „Dynamic Modeling of LatentHeat Thermal Battery“. In: *Idaho National Laboratory* (2024). URL: [https://inldigitallibrary.inl.gov/sites/STI/STI/Sort\\_92815.pdf](https://inldigitallibrary.inl.gov/sites/STI/STI/Sort_92815.pdf) (besucht am 13.08.2025).
- [MIL15] Christian Milan, Michael Stadler, Gonçalo Cardoso und Salman Mas-hayekh. „Modeling of non-linear CHP efficiency curves in distributed energy systems“. In: *Applied Energy* 148 (Juni 2015), S. 334–347. ISSN: 0306-2619. DOI: 10.1016/j.apenergy.2015.03.053. URL: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.03.053>.
- [MÖL11] Ralf Möller, Hans Pöter und Knut Schwarze. *Planen und Bauen mit Trapezprofilen und Sandwichelementen: Gestaltung, Planung, Ausführung*. John Wiley & Sons, Ltd, Feb. 2011. ISBN: 9783433600764. DOI: 10.1002/9783433600764. URL: <https://doi.org/10.1002/9783433600764> (besucht am 30.03.2024).
- [MOR12] S. Mortada, A. Zoughaib, D. Clodic und C. Arzano-Daurelle. „Dynamic modeling of an integrated air-to-air heat pump using Modelica“. In: *International Journal of Refrigeration* 35.5 (Aug. 2012), S. 1335–1348. ISSN: 0140-7007. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2012.03.009. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2012.03.009> (besucht am 19.03.2024).

- [MOS10] Richard H. Moss, Jae A. Edmonds, Kathy A. Hibbard, Martin R. Manning, Steven K. Rose, Detlef P. van Vuuren, Timothy R. Carter, Seita Emori, Mikiko Kainuma, Tom Kram, Gerald A. Meehl, John F. B. Mitchell, Nebojsa Nakicenovic, Keywan Riahi, Steven J. Smith, Ronald J. Stouffer, Allison M. Thomson, John P. Weyant und Thomas J. Wilbanks. „The next generation of scenarios for climate change research and assessment“. In: *Nature* 463.7282 (2010), S. 747–756. DOI: 10.1038/nature08823. URL: <https://doi.org/10.1038/nature08823> (besucht am 27.06.2023).
- [MÜL17] Dirk Müller, Christoph van Treeck, Dirk Henning Braun und Dietmar Wenner. *EnEff:Campus: RoadMap RWTH Aachen : Schlussbericht*. de. 2017. DOI: 10.2314/GBV:1009837389. URL: <https://doi.org/10.2314/GBV:1009837389>.
- [MÜL19] A Müller und P Wörner. „Impact of dynamic CO2 emission factors for the public electricity supply on the life-cycle assessment of energy efficient residential buildings“. In: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 323.1 (Aug. 2019), S. 012036. ISSN: 1755-1315. DOI: 10.1088/1755-1315/323/1/012036. URL: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/323/1/012036> (besucht am 24.10.2024).
- [NEG19] Koji Negishi, Alexandra Lebert, Denise Almeida, Jacques Chevalier und Ligia Tiruta-Barna. „Evaluating climate change pathways through a building’s lifecycle based on Dynamic Life Cycle Assessment“. In: *Building and Environment* 164 (Okt. 2019), S. 106377. ISSN: 0360-1323. DOI: 10.1016/j.buildenv.2019.106377. URL: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106377> (besucht am 30.04.2024).
- [NER11] Günter Neroth und Dieter Vollenschaar. „Dämmstoffe“. In: *Wendehorst Baustoffkunde: Grundlagen – Baustoffe – Oberflächenschutz*. Hrsg. von Günter Neroth und Dieter Vollenschaar. Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 2011, S. 1145–1181. ISBN: 978-3-8348-9919-4. DOI: 10.1007/978-3-8348-9919-4\_18. URL: [https://doi.org/10.1007/978-3-8348-9919-4\\_18](https://doi.org/10.1007/978-3-8348-9919-4_18).
- [NIE23] Björn Nienborg. *Projekt SPEICHER-LCA: Bewertung von Wärmespeichern auf Basis dynamischer Lebenszyklusanalysen*. Fraunhofer ISE Projektbeschreibung. Zugriff am 04.07.2025. 2023. URL: <https://www.ise.fraunhofer.de/de/forschungsprojekte/speicher-lca.html>.
- [NOR24] Geologischer Dienst Nordrhein-Westfalen. *Oberflächennahe Geothermie*. 2024. URL: <https://www.geothermie.nrw.de/oberflaechennah> (besucht am 28.03.2024).

- [NOU20] Nouri, A., Nicolai, A., Krämer, B., Hirth, S., Agudelo, J., Seifert, C., Malhotra, A., Madjidi, M., Frisch, J. und van Treeck, C. ENTWICKLUNG VON QUALITÄTSSTANDARDS FÜR DIE ENERGETISCHE GEBÄUDE- UND ANLAGENSIMULATION ALS PLANUNGSWERKZEUG. 2020. DOI: 10.3217/978-3-85125-786-1-08. URL: <http://dx.doi.org/10.3217/978-3-85125-786-1-08>.
- [NRE24] NREL. Best Research-Cell Efficiency Chart. 2024. URL: <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html> (besucht am 19.03.2024).
- [NUS20] Julia L.K. Nussholz, Freja Nygaard Rasmussen, Katherine Whalen und Andrius Plepys. „Material reuse in buildings: Implications of a circular business model for sustainable value creation“. In: Journal of Cleaner Production 245 (Feb. 2020). ISSN: 0959-6526. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.118546. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118546>.
- [OLH24] Anne Olhoff, Chris Bataille, John Christensen, Michel den Elzen, Taryn Fransen, Neil Grant, Kornelis Blok, Jiang Kejun, Eleonore Soubeyran, William Lamb, Kelly Levin, Joana Portugal-Pereira, Minal Pathak, Takeshi Kuramochi, Costanza Strinati, Stephanie Roe und Joeri Rogelj. Emissions Gap Report 2024: No more hot air ... please! With a massive gap between rhetoric and reality, countries draft new climate commitments. United Nations Environment Programme, Okt. 2024. ISBN: 9789280741858. DOI: 10.59117/20.500.11822/46404. URL: <https://doi.org/10.59117/20.500.11822/46404>.
- [ØST18] Natasha Østergaard, Laura Thorsted, Simona Miraglia, Morten Birkved, Freja Nygaard Rasmussen, Harpa Birgisdóttir, Pradip Kalbar und Stylianos Georgiadis. „Data Driven Quantification of the Temporal Scope of Building LCAs“. In: Procedia CIRP 69 (2018), S. 224–229. ISSN: 22128271. DOI: 10.1016/j.procir.2017.11.057. URL: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.11.057> (besucht am 28.06.2023).
- [PAL12] Michael de Paly, Jozsef Hecht-Méndez, Markus Beck, Philipp Blum, Andreas Zell und Peter Bayer. „Optimization of energy extraction for closed shallow geothermal systems using linear programming“. In: Geothermics 43 (Juli 2012), S. 57–65. ISSN: 0375-6505. DOI: 10.1016/j.geothermics.2012.03.001. URL: <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2012.03.001>.
- [PAN24] GmbH panel sell. Sandwichplatten Wand & Wandpaneele. 2024. URL: <https://www.panelsell.com/sandwichplatten-wand> (besucht am 11.10.2024).

- [PEE21] Wouter Peere, Damien Picard, Iago Cupeiro Figueroa, Wim Boydens und Lieve Helsen. „Validated combined first and last year borefield sizing methodology.“ In: Proceedings of Building Simulation 2021: 17th Conference of IBPSA. BS 2021. KU Leuven, Sep. 2021. DOI: 10.26868/25222708.2021.30180. URL: <https://doi.org/10.26868/25222708.2021.30180>.
- [PEE25] Wouter Peere. Passive and active cooling for an office building. Knowledge base entry, GHETool Cloud. 2025. URL: <https://ghetool.eu/knowledgebase/office-with-passive-and-active-cooling/> (besucht am 21.08.2025).
- [PET22] Jens F. Peters, Diego Iribarren, Pedro Juez Martel und Mercedes Burguillo. „Hourly marginal electricity mixes and their relevance for assessing the environmental performance of installations with variable load or power“. In: Science of The Total Environment 843 (Okt. 2022), S. 156963. ISSN: 0048-9697. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.156963. URL: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.156963>.
- [PHI23] Simon Phillips, Fraunhofer ISE und Werner Warmuth. Photovoltaics Report. 2023. URL: <https://www.ise.fraunhofer.de/en/publications/studies/photovoltaics-report.html> (besucht am 03.05.2024).
- [PIA16] Francesca Pianosi, Keith Beven, Jim Freer, Jim W. Hall, Jonathan Rougier, David B. Stephenson und Thorsten Wagener. „Sensitivity analysis of environmental models: A systematic review with practical workflow“. In: Environmental Modelling Software 79 (Mai 2016), S. 214–232. ISSN: 1364-8152. DOI: 10.1016/j.envsoft.2016.02.008. URL: <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2016.02.008>.
- [PIN17] Jerson A. Pinzon, Pedro P. Vergara, Luiz C. P. da Silva und Marcos J. Rider. „An MILP model for optimal management of energy consumption and comfort in smart buildings“. In: 2017 IEEE Power and Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT). IEEE, Apr. 2017, S. 1–5. DOI: 10.1109/isgt.2017.8085956. URL: <https://doi.org/10.1109/ISGT.2017.8085956> (besucht am 19.12.2024).
- [PON16] Kris Poncelet, Erik Delarue, Daan Six und William D’haeseleer. „Myopic optimization models for simulation of investment decisions in the electric power sector“. In: 2016 13th International Conference on the European Energy Market (EEM). IEEE, Juni 2016, S. 1–9. DOI: 10.1109/eem.2016.7521261. URL: <https://doi.org/10.1109/EEM.2016.7521261>.

- [POT21] Tajda Potrč Obrecht, Sabina Jordan, Andraž Legat und Alexander Passer. „The role of electricity mix and production efficiency improvements on greenhouse gas (GHG) emissions of building components and future refurbishment measures“. In: *The International Journal of Life Cycle Assessment* 26.5 (Mai 2021), S. 839–851. ISSN: 1614-7502. DOI: 10.1007/s11367-021-01920-2. URL: <https://doi.org/10.1007/s11367-021-01920-2>.
- [PRA21] Anita Prapotnik Brdnik. „Thermal Performance Optimization of Double and Triple Glazing Systems for Slovenian Climate Conditions“. In: *Sustainability* 13.21 (Okt. 2021), S. 11857. ISSN: 2071-1050. DOI: 10.3390/su132111857. URL: <https://doi.org/10.3390/su132111857>.
- [PRO21] Prognos, Öko-Institut und Wuppertal-Institut. *Klimaneutrales Deutschland 2045: Wie Deutschland seine Klimaziele schon vor 2050 erreichen kann*. 2021. URL: <https://www.agora-energiewende.de/veroeffentlichungen/klimaneutrales-deutschland-2045> (besucht am 23.06.2023).
- [QUA19] Davide Quaggiotto, Angelo Zarrella, Giuseppe Emmi, Michele De Carli, Luc Pockelé, Jacques Vercruyssen, Mario Psyk, Davide Righini, Antonio Galgaro, Dimitrios Mendrinou und Adriana Bernardi. „Simulation-Based Comparison Between the Thermal Behavior of Coaxial and Double U-Tube Borehole Heat Exchangers“. In: *Energies* 12.12 (Juni 2019), S. 2321. ISSN: 1996-1073. DOI: 10.3390/en12122321. URL: <https://doi.org/10.3390/en12122321>.
- [QUA23] Volker Quaschnig. *Regenerative Energiesysteme. Technologie - Berechnung - Klimaschutz*. 12., aktualisierte Auflage. *Literaturverzeichnis*: Seite 461-469. München: Hanser, 2023. 480 S. ISBN: 9783446477773. URL: <https://www.volker-quaschnig.de/publis/regen/index.php> (besucht am 19.03.2024).
- [RAM19] D Ramon und K Allacker. „Integrating climate change in life cycle assessment of buildings: literature review“. In: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 323.1 (Aug. 2019), S. 012064. ISSN: 1755-1315. DOI: 10.1088/1755-1315/323/1/012064. URL: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/323/1/012064> (besucht am 04.12.2024).
- [RAY15] Jasmin Raymond, Serge Mercier und Luc Nguyen. „Designing coaxial ground heat exchangers with a thermally enhanced outer pipe“. In: *Geothermal Energy* 3.1 (Apr. 2015). ISSN: 2195-9706. DOI: 10.1186/s40517-015-0027-3. URL: <https://doi.org/10.1186/s40517-015-0027-3>.

- [REG19] Vitali Reger, Markus Kuhnhenne, Helmut Hachul, Bernd Döring, Thimo Ebbert, Tobias Blanke und Joachim Götttsche. „Plusenergiegebäude 2.0 in Stahlleichtbauweise“. In: *Stahlbau* 88.6 (2019), S. 522–528. ISSN: 0038-9145. DOI: 10.1002/stab.201900034. URL: <https://doi.org/10.1002/stab.201900034> (besucht am 23.06.2023).
- [RES21] Eirik Resch, Inger Andresen, Francesco Cherubini und Helge Brattebø. „Estimating dynamic climate change effects of material use in buildings—Timing, uncertainty, and emission sources“. In: *Building and Environment* 187 (Jan. 2021), S. 107399. ISSN: 0360-1323. DOI: 10.1016/j.buildenv.2020.107399. URL: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107399>.
- [RES25] Erhard Reschenhofer. „The latest monthly highs suggest that the 1.5°C Paris Agreement threshold will probably be exceeded before 2028“. In: (März 2025). DOI: 10.48550/ARXIV.2503.12425. arXiv: 2503.12425 [physics.aos-ph]. URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2503.12425>.
- [RIT21] Michael J. Ritchie, Jacobus A. A. Engelbrecht und M. J. (Thinus) Booysen. „Which Strategy Saves the Most Energy for Stratified Water Heaters?“ In: *Energies* 14.16 (Aug. 2021), S. 4859. ISSN: 1996-1073. DOI: 10.3390/en14164859. URL: <https://doi.org/10.3390/en14164859> (besucht am 13.08.2025).
- [ROD22] Fernando A. Rodrigues und Marcelo J.S. de Lemos. „Discharge effectiveness of thermal energy storage systems“. In: *Applied Thermal Engineering* 209 (Juni 2022), S. 118232. ISSN: 1359-4311. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2022.118232. URL: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.118232> (besucht am 13.08.2025).
- [ROU08] Lothar Rouvel, Christian Seifert und Frank Zimmermann. „Die künftige VDI 2078 im Kontext zur europäischen Normung“. In: *HLH – Heizung Lüftung Klimatechnik Haustechnik* 59.8 (Aug. 2008). Artikel über die in Vorbereitung befindliche VDI 2078 und deren Bezug zur europäischen Normung., S. 49–54. URL: [https://www.gebsimu.de/VDI2078\\_EN\\_Normung\\_HLH\\_2008.pdf](https://www.gebsimu.de/VDI2078_EN_Normung_HLH_2008.pdf).
- [ROU16a] Charlotte Roux, Patrick Schalbart, Edi Assoumou und Bruno Peuportier. „Integrating climate change and energy mix scenarios in LCA of buildings and districts“. In: *Applied Energy* 184 (Dez. 2016), S. 619–629. ISSN: 0306-2619. DOI: 10.1016/j.apenergy.2016.10.043. URL: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.10.043> (besucht am 03.12.2024).

- [ROU16b] Charlotte Roux, Patrick Schalbart und Bruno Peuportier. „Accounting for temporal variation of electricity production and consumption in the LCA of an energy-efficient house“. In: *Journal of Cleaner Production* 113 (Feb. 2016), S. 532–540. ISSN: 0959-6526. DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.11.052. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.11.052> (besucht am 24. 10. 2024).
- [ROU16c] Charlotte Roux, Patrick Schalbart und Bruno Peuportier. „Development of an electricity system model allowing dynamic and marginal approaches in LCA—tested in the French context of space heating in buildings“. In: *The International Journal of Life Cycle Assessment* 22.8 (Dez. 2016), S. 1177–1190. ISSN: 1614-7502. DOI: 10.1007/s11367-016-1229-z. URL: <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1229-z> (besucht am 03. 12. 2024).
- [SAL00] A. Saltelli, S. Tarantola und F. Campolongo. „Sensitivity Analysis as an Ingredient of Modeling“. In: *Statistical Science* 15.4 (Nov. 2000), S. 377–395. URL: <https://www.jstor.org/stable/2676831>.
- [SAL09] Andrea Saltelli, Francesca Campolongo und Jessica Cariboni. „Screening important inputs in models with strong interaction properties“. In: *Reliability Engineering System Safety* 94.7 (Juli 2009), S. 1149–1155. ISSN: 0951-8320. DOI: 10.1016/j.ress.2008.10.007. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ress.2008.10.007>.
- [SAL10] Andrea Saltelli, Paola Annoni, Ivano Azzini, Francesca Campolongo, Marco Ratto und Stefano Tarantola. „Variance based sensitivity analysis of model output. Design and estimator for the total sensitivity index“. In: *Computer Physics Communications* 181.2 (Feb. 2010), S. 259–270. ISSN: 0010-4655. DOI: 10.1016/j.cpc.2009.09.018. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cpc.2009.09.018>.
- [SAN12] David Garcia Sanchez, Bruno Lacarrière, Marjorie Musy und Bernard Bourges. *Application of sensitivity analysis in building energy simulations: combining first and second order elementary effects Methods*. 2012. DOI: 10.48550/ARXIV.1203.3055. URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1203.3055>.
- [SAN20] M. Santamouris. *Energy and Climate in the Urban Built Environment*. Taylor & Francis Group, 2020. ISBN: 9780367578824.
- [SCH04] T. Schmidt, D. Mangold und H. Müller-Steinhagen. „Central solar heating plants with seasonal storage in Germany“. In: *Solar Energy* 76.1–3 (Jan. 2004), S. 165–174. ISSN: 0038-092X. DOI: 10.1016/j.solener.2003.07.025. URL: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2003.07.025> (besucht am 13. 08. 2025).

- [SCH15] Thomas Schuetz, Hassan Harb, Rita Streblov und Dirk Müller. „Comparison of models for thermal energy storage units and heat pumps in mixed integer linear programming“. In: 28th International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems (ECOS). 2015. URL: [https://www.researchgate.net/profile/Thomas-Schuetz/publication/279916800\\_Comparison\\_of\\_models\\_for\\_thermal\\_energy\\_storage\\_units\\_and\\_heat\\_pumps\\_in\\_mixed\\_integer\\_linear\\_programming/links/559e1f0a08ae04e3650916dc/Comparison-of-models-for-thermal-energy-storage-units-and-heat-pumps-in-mixed-integer-linear-programming.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Thomas-Schuetz/publication/279916800_Comparison_of_models_for_thermal_energy_storage_units_and_heat_pumps_in_mixed_integer_linear_programming/links/559e1f0a08ae04e3650916dc/Comparison-of-models-for-thermal-energy-storage-units-and-heat-pumps-in-mixed-integer-linear-programming.pdf).
- [SCH17] Dietrich Schmidt, Anna Kallert, Markus Blesl, Svend Svendsen, Hongwei Li, Natasa Nord und Kari Sipilä. „Low Temperature District Heating for Future Energy Systems“. In: Energy Procedia 116 (Juni 2017), S. 26–38. ISSN: 1876-6102. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.05.052. URL: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.05.052>.
- [SCH23] Anika Schmidt, Janine Pößneck, Annegret Haase und Sigrun Kabisch. „Quartier und urbane Resilienz: Themenfelder, Befunde und Forschungsbedarf“. In: Die Resiliente Stadt. Springer Berlin Heidelberg, Sep. 2023, S. 73–89. ISBN: 9783662669167. DOI: 10.1007/978-3-662-66916-7\_5. URL: [https://doi.org/10.1007/978-3-662-66916-7\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-662-66916-7_5).
- [SCH18] Thomas Schütz. „Optimale Auslegung von Energiewandlungsmaschinen und Gebäudehüllen in Wohngebieten“. en. Diss. RWTH Aachen, 2018, S. 2018. DOI: 10.18154/RWTH-2019-02124. URL: <https://doi.org/10.18154/RWTH-2019-02124>.
- [SCH91] Klaus Schwamberger. „Modellbildung und Regelung von Gebäudeheizungsanlagen mit Wärmepumpen“. In: Firtschrittberichte VDI Reihe 6: Energieerzeugung 263 (1991). URL: <https://katalog.slub-dresden.de/id/0-27191484X> (besucht am 19. 03. 2024).
- [SEC21] Nils Seckinger und Peter Radgen. „Dynamic Prospective Average and Marginal GHG Emission Factors—Scenario-Based Method for the German Power System until 2050“. In: Energies 14.9 (2021), S. 2527. DOI: 10.3390/en14092527. URL: <https://doi.org/10.3390/en14092527> (besucht am 23. 06. 2023).
- [SEN21] Frank Sensfuß, Benjamin Lux, Christiane Bernath, Christoph Kiefer, Benjamin Pfluger und Chris Kleinschmitt. Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland 3: Kurzbericht: 3 Hauptszenarien. 2021. URL: <https://www.langfristszenarien.de/enertile-explorer-de/index.php> (besucht am 23. 06. 2023).

- [SEZ05] I. Sezai, L.B.Y. Aldabbagh, U. Atikol und H. Hacisevki. „Performance improvement by using dual heaters in a storage-type domestic electric water-heater“. In: *Applied Energy* 81.3 (Juli 2005), S. 291–305. ISSN: 0306-2619. DOI: 10.1016/j.apenergy.2004.07.011. URL: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2004.07.011> (besucht am 25.03.2024).
- [SIL12] Kyle Siler-Evans, Inês Lima Azevedo und M. Granger Morgan. „Marginal Emissions Factors for the U.S. Electricity System“. In: *Environmental Science & Technology* 46.9 (Apr. 2012), S. 4742–4748. ISSN: 1520-5851. DOI: 10.1021/es300145v. URL: <https://doi.org/10.1021/es300145v>.
- [SIN22] Ramkishore Singh, Dharam Buddhi, Samar Thapa, Chander Prakash, Rajesh Singh, Atul Sharma, Shane Sheoran und Kuldeep Kumar Saxena. „Sensitivity Analysis for Decisive Design Parameters for Energy and Indoor Visual Performances of a Glazed Façade Office Building“. In: *Sustainability* 14.21 (Okt. 2022), S. 14163. ISSN: 2071-1050. DOI: 10.3390/su142114163. URL: <https://doi.org/10.3390/su142114163>.
- [SOB01] I.M Sobol'. „Global sensitivity indices for nonlinear mathematical models and their Monte Carlo estimates“. In: *Mathematics and Computers in Simulation* 55.1–3 (Feb. 2001), S. 271–280. ISSN: 0378-4754. DOI: 10.1016/S0378-4754(00)00270-6. URL: [https://doi.org/10.1016/S0378-4754\(00\)00270-6](https://doi.org/10.1016/S0378-4754(00)00270-6).
- [SOH20] Joshua Sohn, Pradip Kalbar, Benjamin Goldstein und Morten Birkved. „Defining Temporally Dynamic Life Cycle Assessment: A Review“. In: *Integrated environmental assessment and management* 16.3 (2020), S. 314–323. DOI: 10.1002/ieam.4235. URL: <https://doi.org/10.1002/ieam.4235> (besucht am 27.06.2023).
- [SOL23] Solarenergie.de. Alles zum Wirkungsgrad von Solarzellen. Feb. 2023. URL: <https://www.solarenergie.de/solarmodule/wirkungsgrad-von-solarzellen>.
- [SOW08] Daniel Setrak Sowmy und Racine T.A. Prado. „Assessment of energy efficiency in electric storage water heaters“. In: *Energy and Buildings* 40.12 (Jan. 2008), S. 2128–2132. ISSN: 0378-7788. DOI: 10.1016/j.enbuild.2008.06.007. URL: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2008.06.007> (besucht am 25.03.2024).
- [SPI20] Eric Spinnräger. „Kostensimulationsmodell zur probabilistischen Lebenszykluskostenermittlung auf Basis digitaler Gebäudemodelle mithilfe einer Monte-Carlo-Simulation“. de. Diss. 2020, S. 2020. DOI:

- 10.18154 / RWTH - 2020 - 08008. URL: <https://doi.org/10.18154/RWTH-2020-08008>.
- [SPR17] Christoph Sprengard. Vakuum-Isolations-Paneele (VIP) in der Bauanwendung: vom Dämmstoff zum Dämmsystem. Verarbeitung, Befestigung, Dauerhaftigkeit : Forschungsbericht FO-2012/08. Hrsg. von Sebastian Treml, Max Engelhardt, Holger Simon und Florian Kagerer. Forschungsinitiative Zukunft Bau F 3036. Gefördert vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB). - Aktenzeichen: II3-F20-11-1-089/SWD-10.08.18.7.-12.32. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2017. 155 S. ISBN: 9783738800234.
- [STA14] F. Stazi, F. Tittarelli, G. Politi, C. Di Perna und P. Munafò. „Assessment of the actual hygrothermal performance of glass mineral wool insulation applied 25 years ago in masonry cavity walls“. In: *Energy and Buildings* 68 (2014), S. 292–304. ISSN: 03787788. DOI: 10.1016/j.enbuild.2013.09.032. URL: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.09.032> (besucht am 16. 10. 2023).
- [STE17] Michael Sterner und Ingo Stadler. *Energiespeicher - Bedarf, Technologien, Integration*. Springer Berlin Heidelberg, 2017. ISBN: 9783662488935. DOI: 10.1007/978-3-662-48893-5. URL: <https://doi.org/10.1007/978-3-662-48893-5> (besucht am 02. 10. 2024).
- [STI22] Stiftung, Klimaneutralität. Szenarienvergleich: Vergleich der „Big 5“ Klimaneutralitätsszenarien. 2022. URL: <https://www.stiftung-klima.de/de/themen/klimaneutralitaet/szenarienvergleich/> (besucht am 23. 06. 2023).
- [STO20a] Ingrid Stober und Kurt Bucher. „Erdwärmesonden“. In: *Geothermie*. Springer Berlin Heidelberg, 2020, S. 75–139. ISBN: 9783662609408. DOI: 10.1007/978-3-662-60940-8\_6.
- [STO20b] Ingrid Stober und Kurt Bucher. „Geothermische Nutzungsmöglichkeiten“. In: *Geothermie*. Springer Berlin Heidelberg, 2020, S. 39–70. ISBN: 9783662609408. DOI: 10.1007/978-3-662-60940-8\_4. URL: [https://doi.org/10.1007/978-3-662-60940-8\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-662-60940-8_4).
- [SU17] Shu Su, Xiaodong Li, Yimin Zhu und Borong Lin. „Dynamic LCA framework for environmental impact assessment of buildings“. In: *Energy and Buildings* 149 (2017), S. 310–320. ISSN: 03787788. DOI: 10.1016/j.enbuild.2017.05.042. URL: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.05.042> (besucht am 28. 06. 2023).

- [SU21] Shu Su, Huan Zhang, Jian Zuo, Xiaodong Li und Jingfeng Yuan. „Assessment models and dynamic variables for dynamic life cycle assessment of buildings: a review“. In: *Environmental science and pollution research international* 28.21 (2021), S. 26199–26214. DOI: 10.1007/s11356-021-13614-1. URL: <https://doi.org/10.1007/s11356-021-13614-1> (besucht am 02.10.2023).
- [TAL09] El-Ghazali Talbi. *Metaheuristics. From design to implementation*. Includes bibliographical references and index. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2009. 593 S. ISBN: 9780470496909.
- [TEC24] Ecochain Technologies. What is ecoinvent? – Meet the LCI Database. 2024. URL: <https://ecochain.com/blog/what-is-ecoinvent/> (besucht am 08.12.2024).
- [TEI21] Holger Teichgraeber, Lucas Elias Küpper und Adam R. Brandt. „Designing reliable future energy systems by iteratively including extreme periods in time-series aggregation“. In: *Applied Energy* 304 (Dez. 2021), S. 117696. ISSN: 0306-2619. DOI: 10.1016/j.apenergy.2021.117696. URL: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117696>.
- [THE24] C. Thelen, H. Nolte, M. Kaiser, P. Jürgens, P. Müller, C. Senkpiel und C. Kost. *Wege zu einem klimaneutralen Energiesystem: Bundesländer im Transformationsprozess*. Techn. Ber. Fraunhofer ISE, 2024.
- [THO06] M. Thomas, A.C.S Hayden und D. MacKenzie. „Reducing GHG Emissions Through Efficient Water Heating Technologies“. In: 2006 IEEE EIC Climate Change Conference. IEEE, Mai 2006. DOI: 10.1109/eicccc.2006.277277. URL: <https://doi.org/10.1109/EICCCC.2006.277277>.
- [THO21] Kasper Emil Thorvaldsen, Magnus Korpås, Karen Byskov Lindberg und Hossein Farahmand. „A stochastic operational planning model for a zero emission building with emission compensation“. In: *Applied Energy* 302 (Nov. 2021), S. 117415. ISSN: 0306-2619. DOI: 10.1016/j.apenergy.2021.117415. URL: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117415>.
- [TJA21] Tjarko Tjaden, Hauke Hoops und Kai Rösken. RE-Lab-Projects/hplib: v1.9: heat pump library (v2.0). en. 2021. DOI: 10.5281/ZENODO.5521597. URL: <https://doi.org/10.5281/zenodo.5521597> (besucht am 19.03.2024).
- [TRA16] Cong Toan Tran, Philippe Rivière und Paul Waide. „Energy Efficiency Modelling of Residential Air Source Heat Pump Water Heater“. In: *Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems* 4.1 (März 2016), S. 69–88. ISSN: 1848-9257. DOI:

- 10.13044/j.sdewes.2016.04.0007. URL: <http://dx.doi.org/10.13044/j.sdewes.2016.04.0007> (besucht am 19. 03. 2024).
- [TRE23] Sebastian Treml, Christoph Sprengard, Wolfgang Albrecht, Andreas H. Holm und Claus Karrer. Technologien und Techniken zur Verbesserung der Energieeffizienz von Gebäuden durch Wärmedämmstoffe - Metastudie Wärmedämmstoffe - Produkte - Anwendungen - Innovationen. Techn. Ber. FIW München, 2023. URL: [https://fiw-muenchen.de/media/publikationen/pdf/2023-04-03\\_Update\\_Metastudie.pdf](https://fiw-muenchen.de/media/publikationen/pdf/2023-04-03_Update_Metastudie.pdf) (besucht am 28. 03. 2024).
- [TRE10] Christoph Alban van Treeck. „Introduction to building performance modeling and simulation“. en. Diss. 2010, S. 2010. DOI: 10.18154/RWTH-2016-00612. URL: <https://doi.org/10.18154/RWTH-2016-00612>.
- [TSC15] Karin Tschiggerl, Milan Topic, Klaus Doschek, Mathias Rauter, Hubert Biedermann und Harald Raupenstrauch. „Gießereiprodukte und ihr Mehrwert bei Lebenszyklusbetrachtungen“. In: Gießerei-Rundschau 62.2015.7/8 (2015), S. 187–194. URL: [https://www.proguss-austria.at/wp-content/uploads/2017/11/Giesserei\\_7\\_8\\_2015.pdf](https://www.proguss-austria.at/wp-content/uploads/2017/11/Giesserei_7_8_2015.pdf) (besucht am 28. 06. 2023).
- [UMW24] Umweltbundesamt. Erneuerbare Energien in Zahlen. März 2024. URL: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/erneuerbare-energien/erneuerbare-energien-in-zahlen> (besucht am 01. 10. 2024).
- [UN15] United Nations UN. Übereinkommen von Paris. 2015. URL: [https://www.bmu.de/fileadmin/Daten\\_BMU/Download\\_PDF/Klimaschutz/paris%5C\\_abkommen%5C\\_bf.pdf](https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Klimaschutz/paris%5C_abkommen%5C_bf.pdf) (besucht am 02. 10. 2024).
- [VAD19] Amir Vadiee, Ambrose Dodoo und Elaheh Jalilzadehazhari. „Heat Supply Comparison in a Single-Family House with Radiator and Floor Heating Systems“. In: Buildings 10.1 (Dez. 2019), S. 5. ISSN: 2075-5309. DOI: 10.3390/buildings10010005. URL: <https://doi.org/10.3390/buildings10010005>.
- [VAN22] Els Van de moortel, Karen Allacker, Frank De Troyer, Erik Schoofs und Luc Stijnen. „Dynamic Versus Static Life Cycle Assessment of Energy Renovation for Residential Buildings“. In: Sustainability 14.11 (Juni 2022), S. 6838. ISSN: 2071-1050. DOI: 10.3390/su14116838. URL: <https://doi.org/10.3390/su14116838>.

- [VAN23] M. Y. C. Van Hove, M. Delghust und J. Laverge. „Uncertainty and sensitivity analysis of building-stock energy models: sampling procedure, stock size and Sobol’ convergence“. In: *Journal of Building Performance Simulation* 16.6 (Apr. 2023), S. 749–771. ISSN: 1940-1507. DOI: 10.1080/19401493.2023.2201816. URL: <https://doi.org/10.1080/19401493.2023.2201816>.
- [VDI12] VDI. VDI 6007: Berechnung des instationären thermischen Verhaltens von Räumen und Gebäuden (Richtlinienreihe). Techn. Ber. Umfasst die Blätter 1 bis 4 (Stand der letzten Veröffentlichung). Jahre 2012-2015. Düsseldorf: VDI-Richtlinien, 2012.
- [VDI15] VDI. VDI 2078: Berechnung der thermischen Lasten und Raumtemperaturen (Auslegung Kühllast und Jahressimulation). Techn. Ber. Düsseldorf: VDI-Richtlinien, Juni 2015.
- [VDI19] e.V. VDI. VDI 4640: Thermische Nutzung des Untergrunds - Erdgekoppelte Wärmepumpenanlagen. 2019. URL: <https://www.vdi.de/richtlinien/details/vdi-4640-blatt-1-thermische-nutzung-des-untergrunds-grundlagen-genehmigungen-umweltaspekte> (besucht am 28.03.2024).
- [VDI22] VDI. VDI 6020: Anforderungen an thermisch-energetische Rechenverfahren zur Gebäude- und Anlagensimulation. Techn. Ber. Düsseldorf: VDI-Richtlinien, Dez. 2022.
- [VER10] Clara Verhelst, Daniel Axehill, Colin Neil Jones und Lieve Helsen. „Impact of the cost function in the optimal control formulation for an air-to-water heat pump system“. In: 2010. URL: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:110657864>.
- [VER21] Verein Deutscher Ingenieure (VDI). VDI 3807 Blatt 1: Nutzungsprofile – Grundlagen. Beuth Verlag. VDI-Handbuch Energietechnik. Düsseldorf, 2021.
- [VIC21] Marta Victoria, Elisabeth Zeyen und Tom Brown. „Speed of technological transformations required in Europe to achieve different climate goals“. In: (2021). DOI: 10.48550/ARXIV.2109.09563. URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2109.09563>.
- [VOG22] Frank U. Vogdt. *Bauphysik: Grundwissen für Architekten*. Springer Fachmedien Wiesbaden, 2022. ISBN: 9783834821898. DOI: 10.1007/978-3-8348-2189-8. URL: <https://doi.org/10.1007/978-3-8348-2189-8> (besucht am 07.05.2024).

- [VUA18] D. Vuarnoz, S. Cozza, T. Jusselme, G. Magnin, T. Schafer, P. Couty und E-L. Niederhauser. „Integrating hourly life-cycle energy and carbon emissions of energy supply in buildings“. In: *Sustainable Cities and Society* 43 (Nov. 2018), S. 305–316. ISSN: 2210-6707. DOI: 10.1016/j.scs.2018.08.026. URL: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.08.026>.
- [WAN24] Guohao Wang, Tengqi Luo, Haizhi Luo, Ran Liu, Yanhua Liu und Zhengguang Liu. „A comprehensive review of building lifecycle carbon emissions and reduction approaches“. In: *City and Built Environment* 2.1 (Okt. 2024). ISSN: 2435-7936. DOI: 10.1007/s44213-024-00036-1. URL: <https://doi.org/10.1007/s44213-024-00036-1>.
- [WAS13] Lisa Wastiels, Johan Van Dessel und Laetitia Delem. „Relevance of the recycling potential (module D) in building LCA: A case study on the retrofitting of a house in Seraing“. In: *Proceedings of SB13 Graz*. Graz, Austria: SB13 Graz Conference, 2013, S. 955–964.
- [WEI13] Karin Weimann, Jan Matyschik, Christian Adam, Tabea Schulz, Elske Linß und Anette Müller. Optimierung des Rückbaus/Abbaus von Gebäuden zur Rückgewinnung und Aufbereitung von Baustoffen unter Schadstoffentfrachtung (insbes. Sulfat) des RC-Materials sowie ökobilanzieller Vergleich von Primär- und Sekundärrohstoffeinsatz inkl. Wiederverwertung. German. Forschungsbericht 05/2013. Dessau-Roßlau, Deutschland: Umweltbundesamt, Feb. 2013, S. 227. URL: <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/optimierung-des-rueckbausabbaus-von-gebaeuden-zur>.
- [WEI21] Matthias Weigold, Felipe Toro, Eberhard Jochem und Oliver Lösch. Bewertung der thermischen Energiespeicher (Latentwärmespeicher) als eine Komponente industrieller Abwärmenutzung - FuE-Bedarf, Marktpotentiale, Hemmnisse und Empfehlungen. Techn. Ber. LWS\_IREEES-Final-002. Statusbericht über Latentwärmespeicher und thermochemische Energiespeicher (100–600 °C). IREEES GmbH, in Zusammenarbeit mit Technischer Universität Darmstadt, Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen (PTW), Feb. 2021. URL: [https://irees.de/wp-content/uploads/2021/02/Status-Bericht-LWS\\_IREEES-Final-002.pdf](https://irees.de/wp-content/uploads/2021/02/Status-Bericht-LWS_IREEES-Final-002.pdf).
- [WEI19] Claudia Weißmann. „Entwicklung eines Simulationstools zur energetischen, ökologischen und ökonomischen Bewertung von vernetzten Energieversorgungskonzepten für Quartiere“. In: *Realisierung Utility 4.0 Band 1*. Springer Fachmedien Wiesbaden, Okt. 2019, S. 367–381. ISBN: 9783658253325. DOI: 10.1007/978-3-658-25332-5\_22. URL: [https://doi.org/10.1007/978-3-658-25332-5\\_22](https://doi.org/10.1007/978-3-658-25332-5_22).

- [WEL18] Lara Welder, D. Severin Ryberg, Leander Kotzur, Thomas Grube, Martin Robinius und Detlef Stolten. „Spatio-temporal optimization of a future energy system for power-to-hydrogen applications in Germany“. In: *Energy* 158 (Sep. 2018), S. 1130–1149. ISSN: 0360-5442. DOI: 10.1016/j.energy.2018.05.059. URL: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.05.059> (besucht am 02. 12. 2024).
- [WIE21] M. Wietschel, L. Zheng, M. Arens, C. Hebling, O. Ranzmeyer, A. Schaadt, C. Hank, A. Sternberg, S. Herkel, C. Kost, M. Ragwitz, U. Herrmann und B. Pfluger. Metastudie Wasserstoff – Auswertung von Energiesystemstudien. Studie im Auftrag des Nationalen Wasserstoffrats. Karlsruhe, Freiburg, Cottbus: Fraunhofer ISI, Fraunhofer ISE, Fraunhofer IEG, 2021. URL: <https://www.ise.fraunhofer.de/de/veroeffentlichungen/studien/metastudie-wasserstoff.html>.
- [WIL12] David Williams, Lucia Elghali, Russel Wheeler und Chris France. „Climate change influence on building lifecycle greenhouse gas emissions: Case study of a UK mixed-use development“. In: *Energy and Buildings* 48 (Mai 2012), S. 112–126. ISSN: 0378-7788. DOI: 10.1016/j.enbuild.2012.01.016. URL: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.01.016> (besucht am 03. 12. 2024).
- [WIL14] Mark Richard Wilby, Ana Belén Rodríguez González und Juan José Vinagre Díaz. „Empirical and dynamic primary energy factors“. In: *Energy* 73 (Aug. 2014), S. 771–779. ISSN: 0360-5442. DOI: 10.1016/j.energy.2014.06.083. URL: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.06.083>.
- [WIL20] Sascha Wilke, Kathrin Menberg, Hagen Steger und Philipp Blum. „Advanced thermal response tests: A review“. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 119 (März 2020), S. 109575. ISSN: 1364-0321. DOI: 10.1016/j.rser.2019.109575. URL: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109575>.
- [WIL23] Baxter Williams, Daniel Bishop und Paul Docherty. „Assessing the energy storage potential of electric hot water cylinders with stochastic model-based control“. In: *Journal of the Royal Society of New Zealand* 54.2 (Apr. 2023), S. 240–256. ISSN: 1175-8899. DOI: 10.1080/03036758.2023.2197241. URL: <https://doi.org/10.1080/03036758.2023.2197241> (besucht am 13. 08. 2015).
- [WIL22] Wolfgang M. Willems. *Lehrbuch der Bauphysik: Wärme – Feuchte – Klima – Schall – Licht – Brand*. Springer Fachmedien Wiesbaden, 2022. ISBN: 9783658340933. DOI: 10.1007/978-3-658-34093-3. URL: <https://doi.org/10.1007/978-3-658-34093-3> (besucht am 07. 05. 2024).

- [WIN01] Walter Winter, Thomas Haslauer und Ingwald Obernberger. „Untersuchungen der Gleichzeitigkeit and in kleinen und and mittleren Nahwärmenetzen“. In: Euroheat & Power (2001). URL: [https://www.verenum.ch/Dokumente/2001\\_Winter-Gleichzeitig.pdf](https://www.verenum.ch/Dokumente/2001_Winter-Gleichzeitig.pdf) (besucht am 21.02.2024).
- [WOL17] Henryk Wolisz, Thomas Schütz, Tobias Blanke, Markus Hagenkamp, Markus Kohn, Mark Wesseling und Dirk Müller. „Cost optimal sizing of smart buildings’ energy system components considering changing end-consumer electricity markets“. In: Energy 137 (2017), S. 715–728. ISSN: 03605442. DOI: 10.1016/j.energy.2017.06.025. URL: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.06.025> (besucht am 23.06.2023).
- [WU24] Mou Wu, Rujing Yan, Jing Zhang, Junqiu Fan, Jiangjiang Wang, Zhang Bai, Yu He, Guoqiang Cao und Keling Hu. „An enhanced stochastic optimization for more flexibility on integrated energy system with flexible loads and a high penetration level of renewables“. In: Renewable Energy 227 (Juni 2024), S. 120502. ISSN: 0960-1481. DOI: 10.1016/j.renene.2024.120502. URL: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.120502>.
- [WÜH22] Michael Wühle. „Ökobilanz und CO<sub>2</sub>-Fußabdruck – zwei Seiten einer Medaille?“ In: Nachhaltigkeit messbar machen. Springer Berlin Heidelberg, 2022, S. 151–160. ISBN: 9783662660478. DOI: 10.1007/978-3-662-66047-8\_8. URL: [https://doi.org/10.1007/978-3-662-66047-8\\_8](https://doi.org/10.1007/978-3-662-66047-8_8).
- [XIN14] Lu Xing. „Estimations of undisturbed ground temperatures using numerical and analytical modeling“. Dissertation. Oklahoma State University, Dez. 2014. URL: <http://hdl.handle.net/20.500.14446/15208>.
- [YAN15a] Qiaoxia Yang, Meng Liu, Chang Shu, Daniel Mmerek, Md. Uzzal Hossain und Xiang Zhan. „Impact Analysis of Window-Wall Ratio on Heating and Cooling Energy Consumption of Residential Buildings in Hot Summer and Cold Winter Zone in China“. In: Journal of Engineering 2015 (2015), S. 1–17. ISSN: 2314-4912. DOI: 10.1155/2015/538254. URL: <https://doi.org/10.1155/2015/538254>.
- [YAN15b] Rebecca Jing Yang und Patrick X.W. Zou. „Building integrated photovoltaics (BIPV): costs, benefits, risks, barriers and improvement strategy“. In: International Journal of Construction Management 16.1 (Dez. 2015), S. 39–53. ISSN: 2331-2327. DOI: 10.1080/15623599.2015.1117709. URL: <https://doi.org/10.1080/15623599.2015.1117709> (besucht am 13.08.2025).

- [YAN23] Wei-Mon Yan, Chu-Yeh Huang, Kai-En Gao, Mohammad Amani, Liang-Han Chien und Ahmad Homayooni. „Study on the performance enhancement of ice storage and melting processes in an ice-on-coil thermal energy storage system“. In: *Journal of Energy Storage* 72 (Nov. 2023), S. 108410. ISSN: 2352-152X. DOI: 10.1016/j.est.2023.108410. URL: <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.108410> (besucht am 13. 08. 2025).
- [YOK15] Ryohei Yokoyama und Yuji Shinano. „MILP Approaches to Optimal Design and Operation of Distributed Energy Systems“. In: *Optimization in the Real World*. Springer Japan, Sep. 2015, S. 157–176. ISBN: 9784431554202. DOI: 10.1007/978-4-431-55420-2\_9. URL: [https://doi.org/10.1007/978-4-431-55420-2\\_9](https://doi.org/10.1007/978-4-431-55420-2_9).
- [YU23] Haibo Yu, Hui Zhang, Xiaolin Han, Ningcheng Gao, Zikang Ke und Junle Yan. „An Empirical Study of a Passive Exterior Window for an Office Building in the Context of Ultra-Low Energy“. In: *Sustainability* 15.17 (Sep. 2023), S. 13210. ISSN: 2071-1050. DOI: 10.3390/su151713210. URL: <https://doi.org/10.3390/su151713210>.
- [YUM24] Jairo Yumbra, Juan M. Home-Ortiz, Tiago Pinto, João P.S. Catalão und José R.S. Mantovani. „Optimal operational planning of distribution systems: A neighborhood search-based matheuristic approach“. In: *Sustainable Energy, Grids and Networks* 38 (Juni 2024), S. 101330. ISSN: 2352-4677. DOI: 10.1016/j.segan.2024.101330. URL: <https://doi.org/10.1016/j.segan.2024.101330>.
- [YUS20] Jubair Yusuf und Sadrul Ula. „A Comprehensive Optimization Solution for Buildings with Distributed Energy Resources and V2G Operation in Smart Grid Applications“. In: *2020 IEEE Power and Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT)*. IEEE, Feb. 2020, S. 1–5. DOI: 10.1109/isgt45199.2020.9087656. URL: <https://doi.org/10.1109/ISGT45199.2020.9087656> (besucht am 19. 12. 2024).
- [ZAK21] Tea Zakula, Nikola Badun, Nenad Ferdelji und Ivo Ugrina. „Framework for the ISO 52016 standard accuracy prediction based on the in-depth sensitivity analysis“. In: *Applied Energy* 298 (2021), S. 117089. ISSN: 03062619. DOI: 10.1016/j.apenergy.2021.117089. URL: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117089> (besucht am 25. 10. 2023).
- [ZAP22] Martin Zapf. „Stromspeicher – Technologien, Kosten und Bedarf“. In: *Stromspeicher und Power-to-Gas im deutschen Energiesystem*. Springer Fachmedien Wiesbaden, 2022, S. 93–167. ISBN:

9783658371296. DOI: 10.1007/978-3-658-37129-6\_2. URL: [https://doi.org/10.1007/978-3-658-37129-6\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-658-37129-6_2).
- [ZAR17] Angelo Zarrella, Giuseppe Emmi, Samantha Graci, Michele De Carli, Matteo Cultrera, Giorgia Santa, Antonio Galgaro, David Bertermann, Johannes Müller, Luc Pockelé, Giulia Mezzasalma, Davide Righini, Mario Psyk und Adriana Bernardi. „Thermal Response Testing Results of Different Types of Borehole Heat Exchangers: An Analysis and Comparison of Interpretation Methods“. In: *Energies* 10.6 (Juni 2017), S. 801. ISSN: 1996-1073. DOI: 10.3390/en10060801. URL: <https://doi.org/10.3390/en10060801>.
- [ZEN21] Ewa Zender-Świercz. „A Review of Heat Recovery in Ventilation“. In: *Energies* 14.6 (März 2021), S. 1759. ISSN: 1996-1073. DOI: 10.3390/en14061759. URL: <https://doi.org/10.3390/en14061759>.
- [ZER22] Alexander Zerrahn. Szenarienübersicht zur Treibhausgasminierungsstrategie. Bericht. Zugriff am 13. Februar 2026. Öko-Institut e.V., 2022. URL: <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/Szenarienuebersicht-THG-Reduktion.pdf>.
- [ZHA23] Chong Zhang, Zhanzhi Yu, Qiuyuan Zhu, Hongqi Shi, Zhongyi Yu und Xinhua Xu. „Air-Permeable Building Envelopes for Building Ventilation and Heat Recovery: Research Progress and Future Perspectives“. In: *Buildings* 14.1 (Dez. 2023), S. 42. ISSN: 2075-5309. DOI: 10.3390/buildings14010042. URL: <https://doi.org/10.3390/buildings14010042>.
- [ZHU23] Zhaoyi Zhuang, Yang Chen, Chaoqun Lv, Jin Zhao, Xianye Ben und Shangyue Li. „A Comparative Analysis of a Radiation-Cooling-Plate-Coupled Adhesion-Jet Air Conditioning System in Different Positions“. In: *Buildings* 13.10 (Okt. 2023), S. 2628. ISSN: 2075-5309. DOI: 10.3390/buildings13102628. URL: <https://doi.org/10.3390/buildings13102628>.



# **Anhang A.**

## **Anhang Kapitel 5**

Tabelle A.1.: Emissionswerte für die Gebäudetechnik inklusive des Recyclingpotentials (Teil 1)

<b>Komponente</b>	<b>PV</b>	<b>Heizstab</b>	<b>S-W-WP</b>	<b>L-W-WP</b>	<b>Geothermie</b>	<b>Batterie</b>
Einheit	[m <sup>2</sup> ]	[kW]	[kW]	[kW]	[m]	[kWh]
GWP	k 2,813E2	6,434E-1	8,408	2,996E1	3,854	2,624E2
[kg CO2-eq.]	b 0	0	1,158E2	4,514E-4	-1,259E2	0
ODP	k 1,685E-9	1,889E-12	1,346E-8	2,346E-10	2,324E-11	1,285E-6
[kg CFC-11 eq.]	b 0	0	1,077E-7	-8,327E-13	-7,613E-10	0
POCP	k 7,965E-1	9,446E-4	2,714E-2	4,299E-2	6,669E-3	7,814E-1
[kg NMVOC-eq.]	b 0	0	2,206E-1	2,690E-4	-2,171E-1	0
AP	k 1,074	2,922E-3	2,511E-2	7,318E-2	7,852E-3	1,239
[Mole H+-eq.]	b 0	0	4,077E-1	1,351E-4	-2,591E-1	0
EP	k 4,832E-4	8,489E-7	6,431E-5	1,358E-4	6,966E-6	8,478E-4
[kg P-eq.]	b 0	0	2,273E-4	-3,662E-7	-2,267E-4	0
ADPE	k 5,901E-3	1,073E-4	4,716E-4	1,275E-3	2,576E-7	1,944E-2
[kg Sb-eq.]	b 0	0	8,451E-3	5,554E-5	-8,444E-6	0
ADPF	k 3,591E3	8,327	2,295E2	3,946E2	4,254E1	3,462E3
[MJ]	b 0	0	1,351E3	-1,501E-1	-1,249E3	0
Datensätze	[BBS24i]	[BBS24b]	[BBS24q;	[BBS24p;	[BBS24u;	[BBS24a]
			BBS24r;	BBS24n;	BBS24v;	
			BBS24s]	BBS24o]	BBS24w]	

Tabelle A.2.: Emissionswerte für die Gebäudetechnik inklusive des Recyclingpotentials (Teil 2)

Komponente	Thermische Kältemaschine			Solarthermie		
	Einheit	[kWh]	[kW]	Speicher	[kW]	[kW]
GWP	k	2,774E1	1,442E2		2,682E1	
[kg CO2-eq]	b	1,161E2	0		0	
ODP	k	1,576E-10	1,259E-9		1,785E-10	
[kg CFC-11 eq.]	b	6,598E-10	0		0	
POCP	k	5,095E-2	2,909E-1		7,847E-2	
[kg NMVOC-eq.]	b	2,133E-1	0		0	
AP	k	1,014E-1	8,438E-1		1,576E-1	
[Mole H+-eq.]	b	4,245E-1	0		0	
EP	k	5,326E-5	3,166E-4		4,210E-5	
[kg P-eq.]	b	2,229E-4	0		0	
ADPE	k	4,862E-4	2,960E-2		1,425E-3	
[kg Sb-eq.]	b	2,035E-3	0		0	
ADPF	k	3,602E2	1,702E3		3,270E2	
[MJ]	b	1,508E3	0		0	
Datensätze		[BBS24m; BBS24l]	[BBS25a]		[BBS25b]	

Tabelle A.3.: Emissionswerte für die Gebäudetechnik exklusive des Recyclingpotentials (Teil 1)

<b>Komponente</b>	<b>PV</b>	<b>Heizstab</b>	<b>S-W-WP</b>	<b>L-W-WP</b>	<b>Geothermie</b>	<b>Batterie</b>
Einheit	[m <sup>2</sup> ]	[kW]	[kW]	[kW]	[m]	[kWh]
GWP	k 3,143E2	9,007E-1	9,993	4,918E1	3,854	2,950E2
[kg CO2-eq.]	b 0	0	2,210E2	0	-1,259E2	0
ODP	k 1,701E-9	3,202E-12	1,346E-8	2,694E-10	2,324E-11	1,285E-6
[kg CFC-11 eq.]	b 0	0	1,074E-7	-7,260E-13	-7,613E-10	0
POCP	k 8,691E-1	1,606E-3	3,129E-2	9,668E-2	6,669E-3	8,391E-1
[kg NMVOC-eq.]	b 0	0	4,300E-1	2,419E-4	-2,171E-1	0
AP	k 1,290	5,913E-3	4,145E-2	3,059E-1	7,852E-3	1,355
[Mole H+-eq.]	b 0	0	8,389E-1	6,757E-5	-2,591E-1	0
EP	k 5,043E-4	1,316E-6	6,584E-5	1,593E-4	6,966E-6	8,589E-4
[kg P-eq.]	b 0	0	2,569E-4	-3,000E-7	-2,267E-4	0
ADPE	k 1,245E-2	2,358E-4	1,129E-3	1,098E-2	2,576E-7	1,946E-2
[kg Sb-eq.]	b 0	0	1,844E-2	6,757E-6	-8,444E-6	0
ADPF	k 3,952E3	1,110E1	2,429E2	5,726E2	4,254E1	3,900E3
[MJ]	b 0	0	2,158E3	0	-1,249E3	0
Datensätze	[BBS24i]	[BBS24b]	[BBS24q;	[BBS24p;	[BBS24u;	[BBS24a]
			BBS24r;	BBS24n;	BBS24v;	
			BBS24s]	BBS24o]	BBS24w]	

Tabelle A.4.: Emissionswerte für die Gebäudetechnik exklusive des Recyclingpotentials (Teil 2)

<b>Komponente</b>	<b>Thermische Speicher</b>
Einheit	[kWh]
GWP	k 3,809E1
[kg CO2-eq]	b 1,594E2
ODP	k 1,629E-10
[kg CFC-11 eq.]	b 6,820E-10
POCP	k 7,020E-2
[kg NMVOC-eq.]	b 5,456E-3
AP	k 1,411E-1
[Mole H+-eq.]	b 5,905E-1
EP	k 5,954E-5
[kg P-eq.]	b 2,492E-4
ADPE	k 5,998E-4
[kg Sb-eq.]	b 2,511E-3
ADPF	k 4,674E2
[MJ]	k 1,956E3
Datensätze	[BBS24m; BBS24i]

Tabelle A.5.: Emissionswerte für die Dämmung inklusive des Recyclingpotentials

	<b>Mineralwolle</b>	<b>EPS</b>	<b>PUR</b>	<b>XPS</b>	<b>Zellulose</b>	<b>Holzfaser</b>	<b>Marktmittel</b>
GWP	7,089E1	1,129E2	1,519E2	1,708E2	1,163E2	4,654E1	9,154E1
ODP	3,241E-10	9,138E-14	-5,361E-11	-4,301E-11	1,133E-9	8,352E-11	2,118E-10
POCP	1,554E-1	1,001	2,542E-1	2,733E-1	4,186E-1	1,688E-1	3,566E-1
AP	4,687E-1	7,061E-2	2,099E-1	1,179E-1	6,609E-1	1,130E-1	3,338E-1
EP	1,082E-4	4,561E-5	3,494E-4	8,691E-5	7,140E-3	6,419E-5	2,551E-4
ADPE	8,522E-6	2,646E-6	1,057E-5	1,491E-6	4,804E-4	1,573E-6	1,642E-5
ADPF	8,809E2	1,457E3	2,112E3	2,182E3	1,371E3	5,894E2	1,169E3
Daten-	[BBS24i]	[BBS24c;	[BBS24k]	[BBS24g]	[BBS24t]	[BBS24h]	
sätze		BBS24d;					
		BBS24e;					
		BBS24f]					

Tabelle A.6.: Emissionswerte für die Dämmung inklusive des Recyclingpotentials

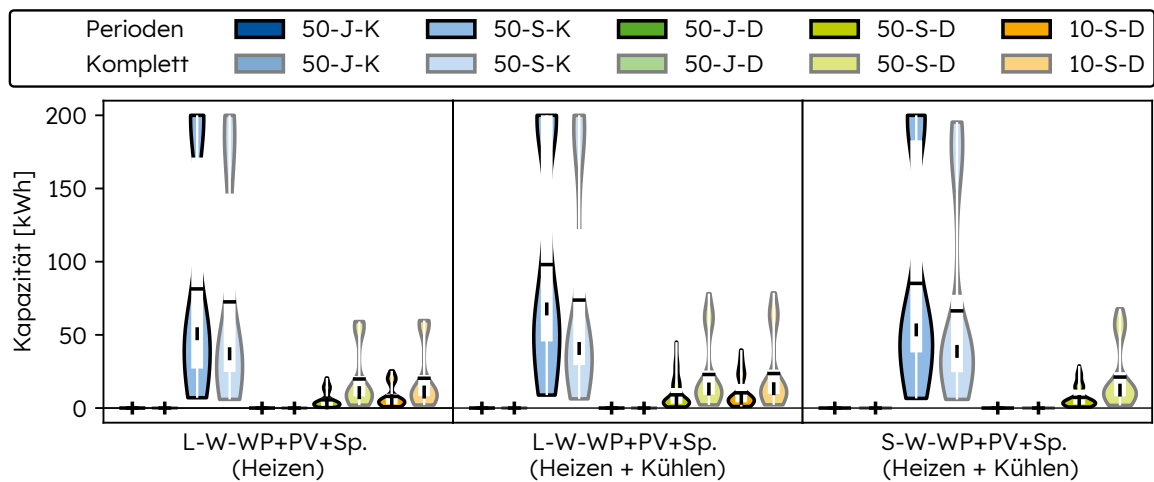
	<b>Mineralfolle</b>	<b>EPS</b>	<b>PUR</b>	<b>XPS</b>	<b>Zellulose</b>	<b>Holzfaser</b>	<b>Marktmittel</b>
GWP	1,440E2	1,442E2	1,769E2	2,122E2	1,471E2	1,309E2	1,497E2
ODP	5,544E-10	4,026E-13	2,682E-10	4,743E-10	1,514E-9	1,127E-9	4,511E-10
POCP	3,591E-1	1,033	2,780E-1	3,124E-1	4,475E-1	2,480E-1	4,917E-1
AP	1,052	1,085E-1	2,350E-1	1,590E-1	6,913E-1	1,962E-1	6,950E-1
EP	7,748E-4	8,143E-5	4,138E-4	1,904E-4	7,216E-3	2,728E-4	6,779E-4
ADPE	2,916E-5	7,371E-6	1,274E-5	5,000E-6	4,830E-4	8,656E-6	3,034E-5
ADPF	1,692E3	1,995E3	2,493E3	2,814E3	1,841E3	1,876E3	1,890E3
Datensättigk.	[BBS24i]	[BBS24c; BBS24d; BBS24e; BBS24f]	[BBS24k]	[BBS24g]	[BBS24t]	[BBS24h]	



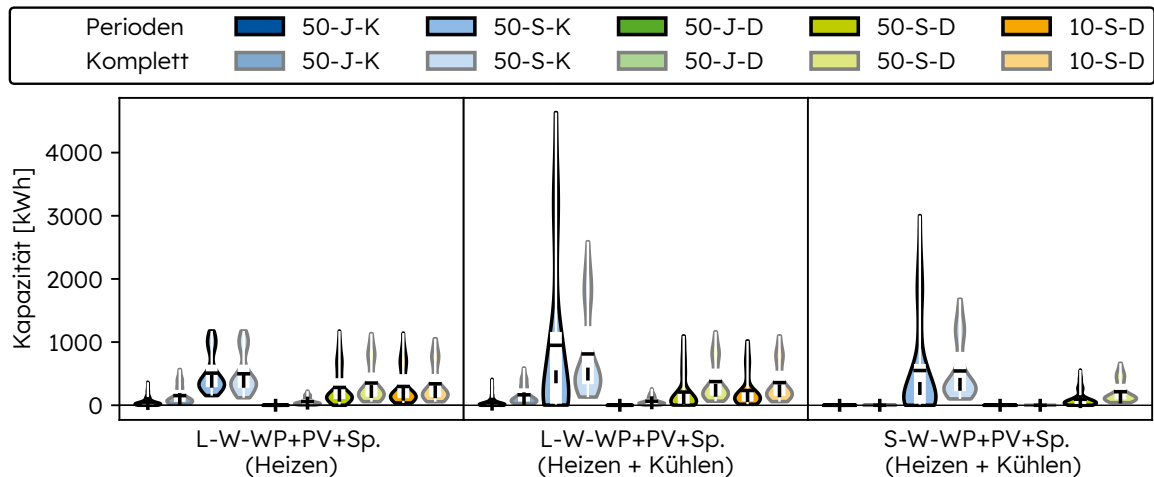
## Anhang B.

### Anhang Kapitel 6

#### B.1. Einfluss der Stromsektordaten in stündlicher Auflösung auf Speichersysteme

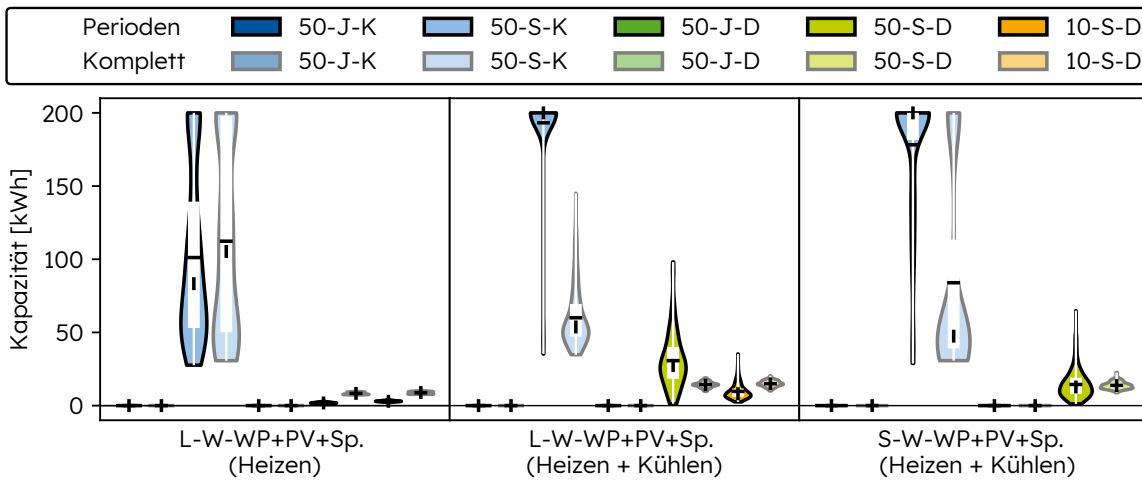


(a) Elektrischer Speicher

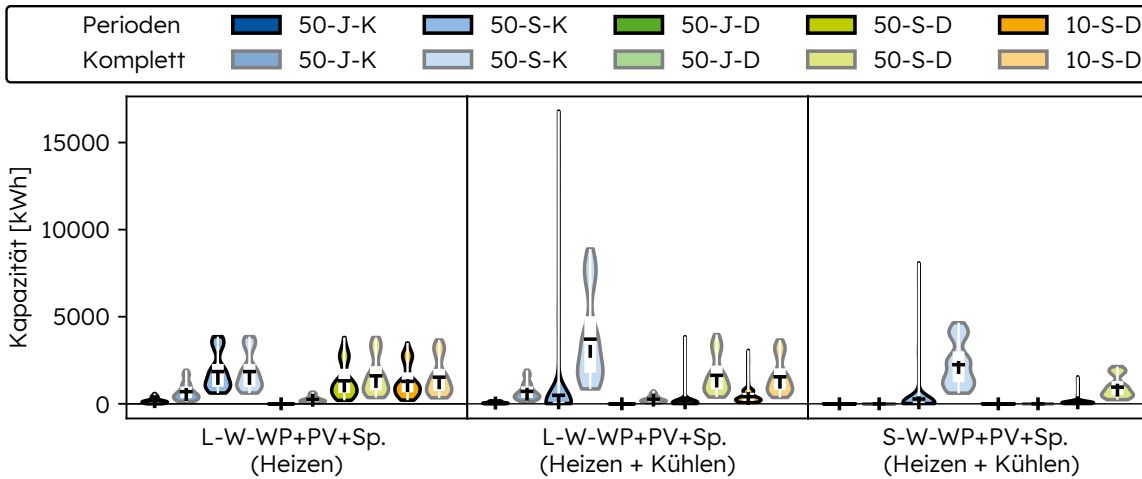


(b) Warmwasserspeicher

Abbildung B.1.: Optimale Speichergrößen für das Bürogebäude in Abhängigkeit von Betriebsfall (nur Heizen bzw. Heizen + Kühlen), Gebäude-technikvariante sowie den Modellierungsansätzen für den Stromsektor als Violinplots mit integriertem Boxplot für Optimierungen über ein volles Jahr sowie über typische Perioden

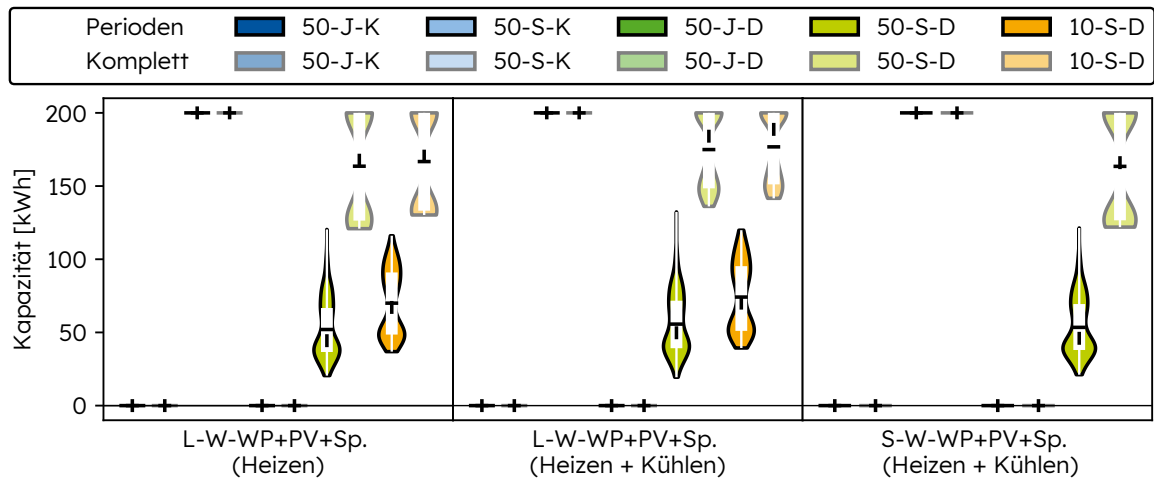


(a) Elektrischer Speicher

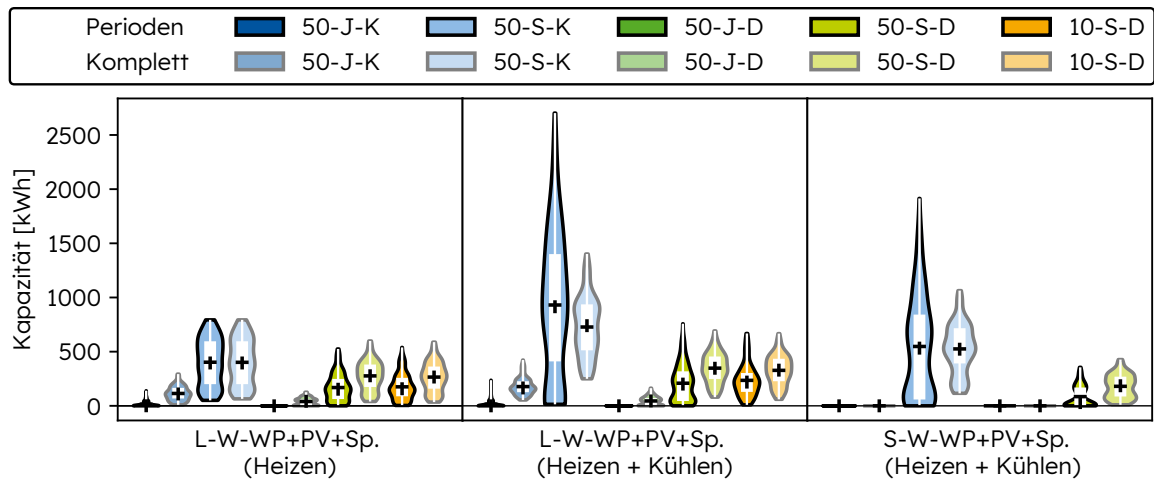


(b) Warmwasserspeicher

Abbildung B.2.: Optimale Speichergrößen für das Bildungsgebäude in Abhängigkeit von Betriebsfall (nur Heizen bzw. Heizen + Kühlen), Gebäude-technikvariante sowie den Modellierungsansätzen für den Stromsektor als Violinplots mit integriertem Boxplot für Optimierungen über ein volles Jahr sowie über typische Perioden



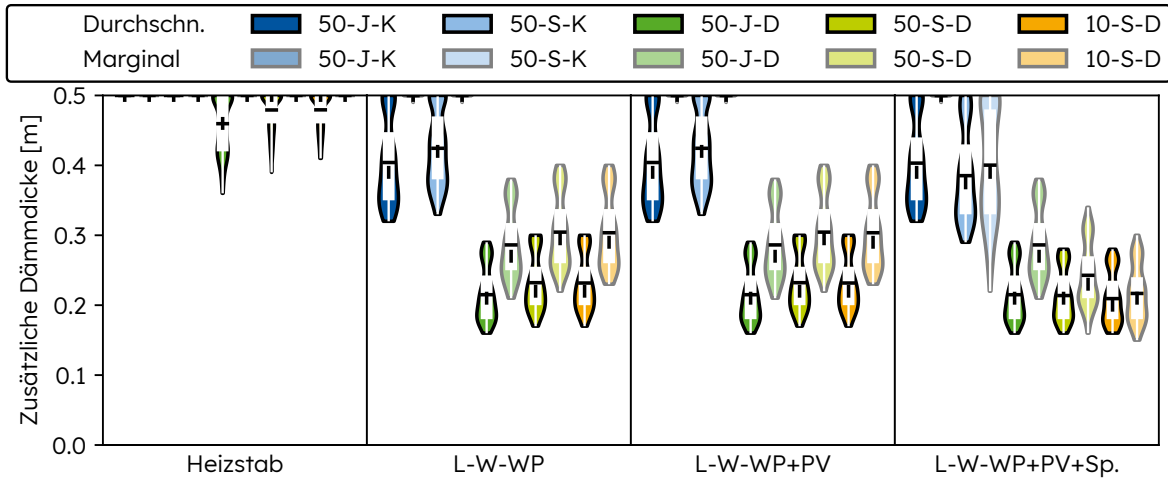
(a) Elektrischer Speicher



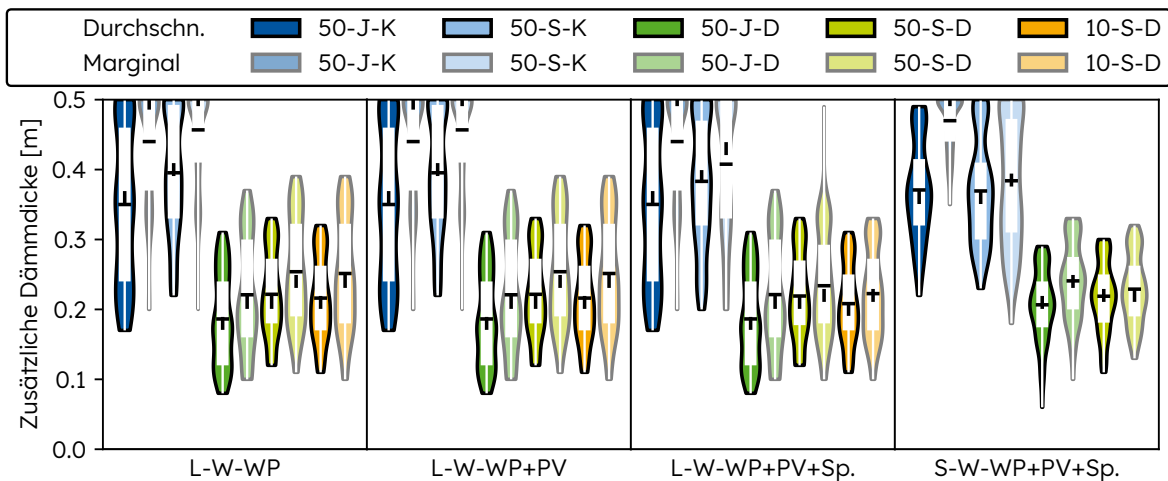
(b) Warmwasserspeicher

Abbildung B.3.: Optimale Speichergrößen für die Gewerbehalle in Abhängigkeit von Betriebsfall (nur Heizen bzw. Heizen + Kühlen), Gebäude-technikvariante sowie den Modellierungsansätzen für den Stromsektor als Violinplots mit integriertem Boxplot für Optimierungen über ein volles Jahr sowie über typische Perioden

## B.2. Einfluss von marginale Stromemissionswerten auf die Dämmstärke

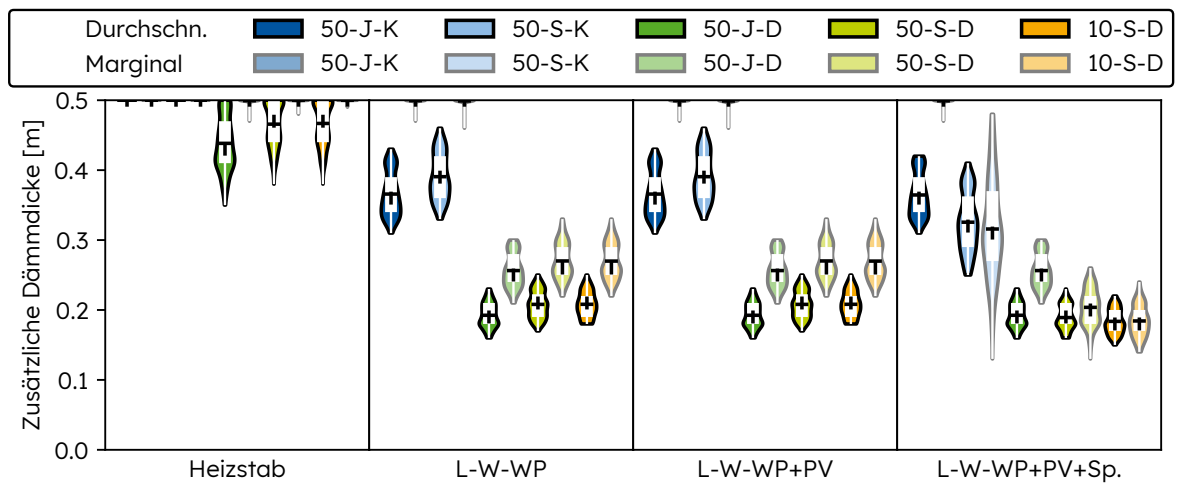


(a) Heizen

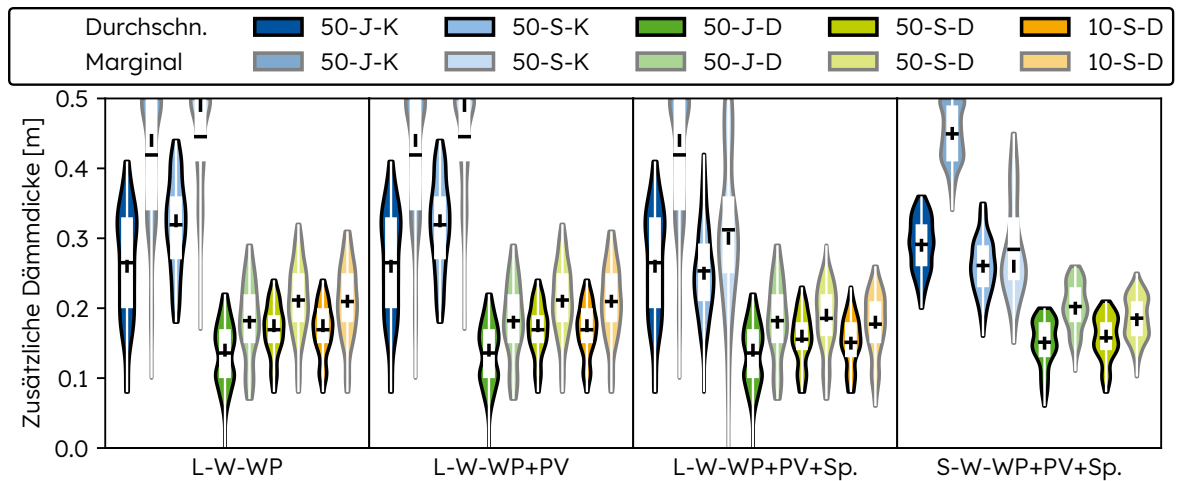


(b) Heizen + Kühlen

Abbildung B.4.: Optimale Dämmstärken für das Bildungsgebäude in Abhängigkeit von Betriebsfall (nur Heizen bzw. Heizen + Kühlen), Gebäude-technikvariante sowie den Modellierungsansätzen für den Stromsektor als Violinplots mit integriertem Boxplot für Optimierungen mit marginalen sowie durchschnittlichen Stromsektoremissionswerten

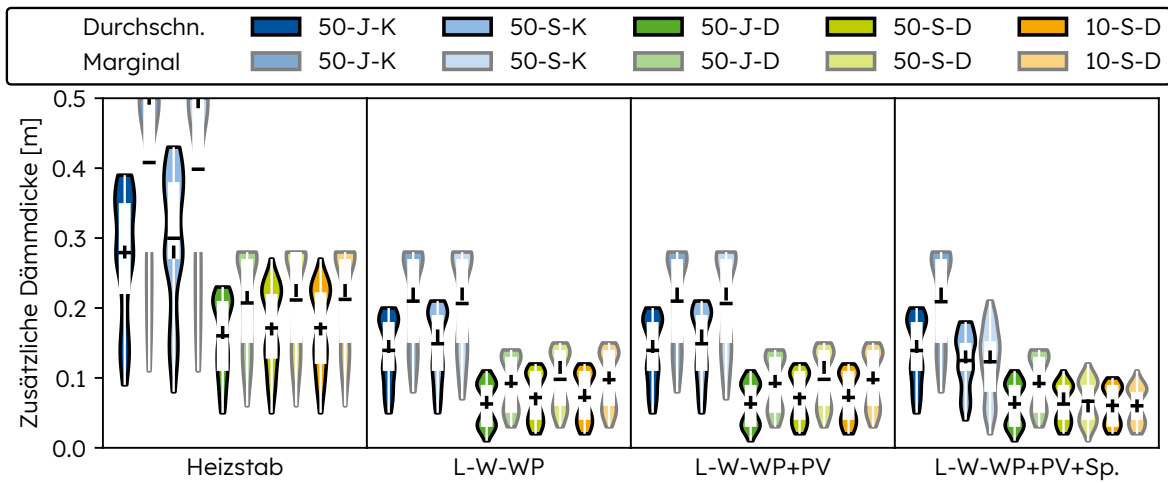


(a) Heizen

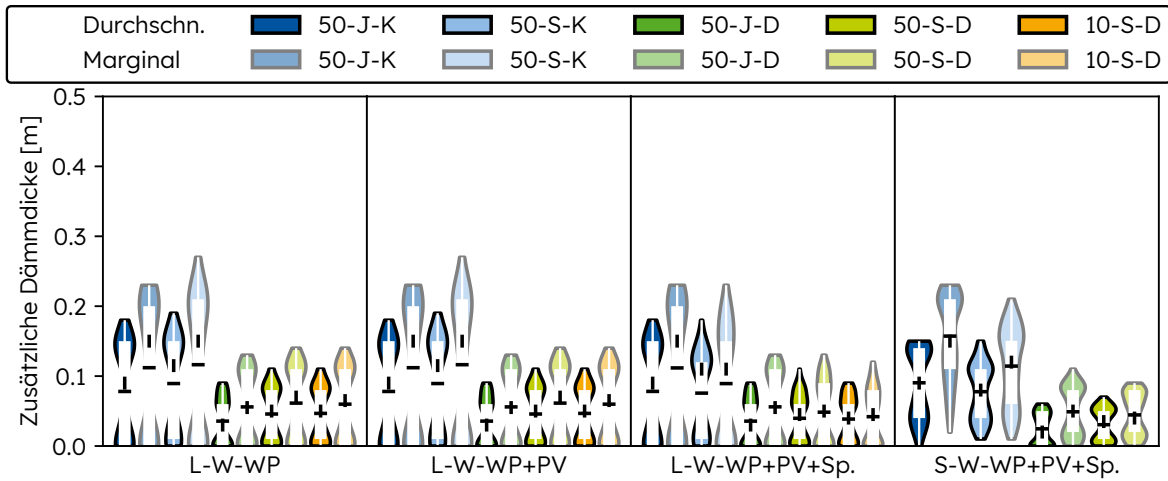


(b) Heizen + Kühlen

Abbildung B.5.: Optimale Dämmstärken für das Bürogebäude in Abhängigkeit von Betriebsfall (nur Heizen bzw. Heizen + Kühlen), Gebäudetechnikvariante sowie den Modellierungsansätzen für den Stromsektor als Violinplots mit integriertem Boxplot für Optimierungen mit marginalen sowie durchschnittlichen Stromsektoremissionswerten



(a) Heizen



(b) Heizen + Kühlen

Abbildung B.6.: Optimale Dämmstärken für die Gewerbehalle in Abhängigkeit von Betriebsfall (nur Heizen bzw. Heizen + Kühlen), Gebäudetechnikvariante sowie den Modellierungsansätzen für den Stromsektor als Violinplots mit integriertem Boxplot für Optimierungen mit marginalen sowie durchschnittlichen Stromsektoremissionswerten

### B.3. Einfluss von Wetterdaten, welche den Klimawandel berücksichtigen

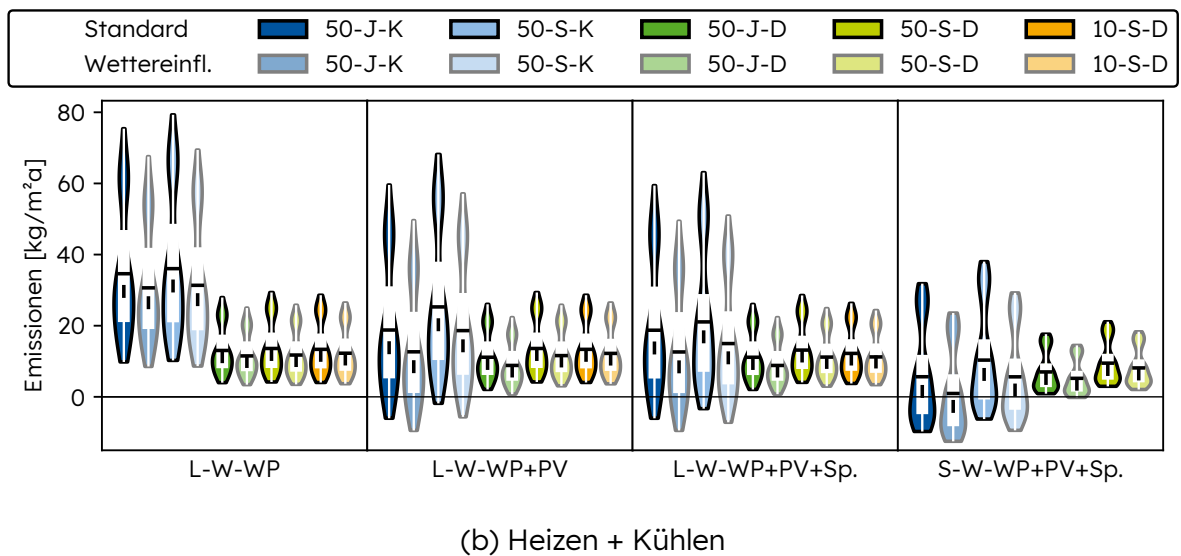
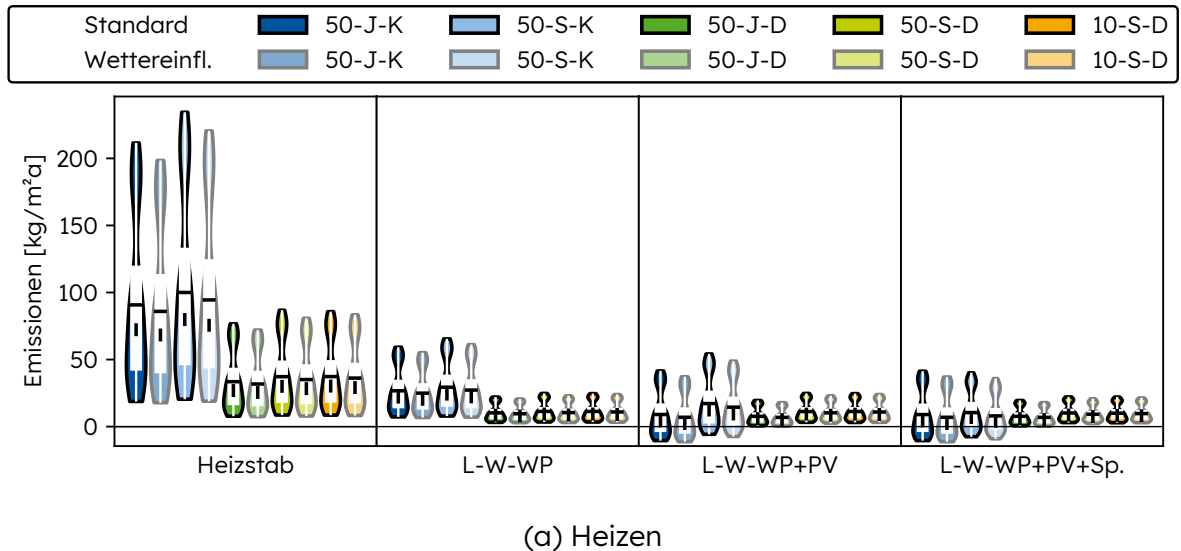
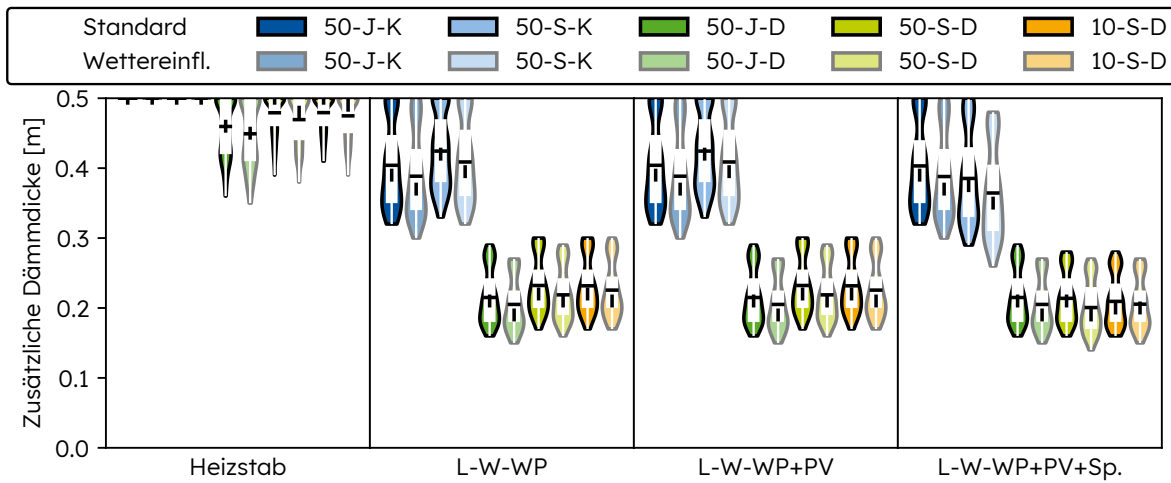
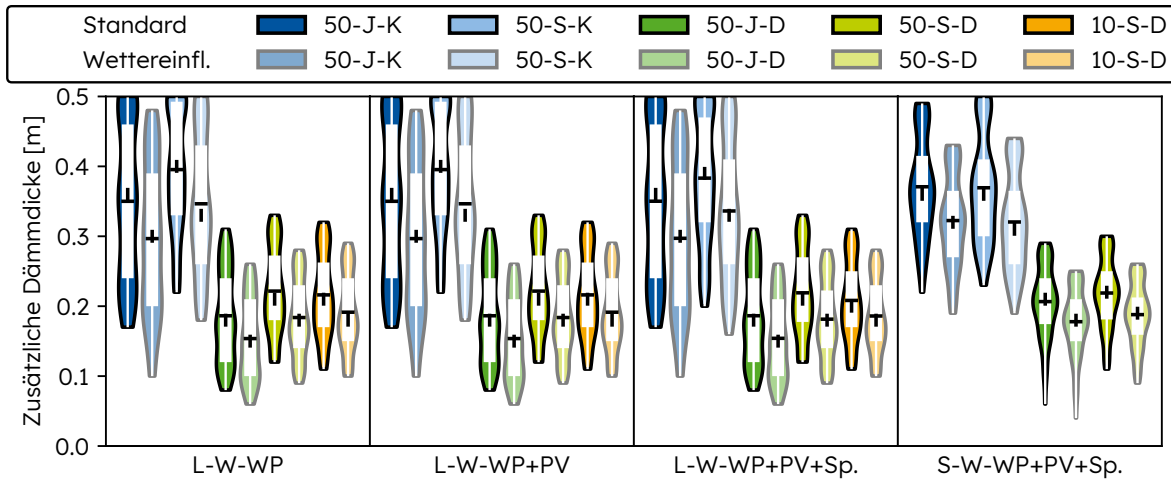


Abbildung B.7.: Optimale Emissionswerte für das Bildungsgebäude in Abhängigkeit von Betriebsfall (nur Heizen bzw. Heizen + Kühlen), Gebäude-technikvariante sowie den Modellierungsansätzen für den Stromsektor als Violinplots mit integriertem Boxplot für Optimierungen mit klimawandelangepassten Wetterdaten sowie nicht angepassten Wetterdaten (Wettereinfl. = Wettereinfluss)

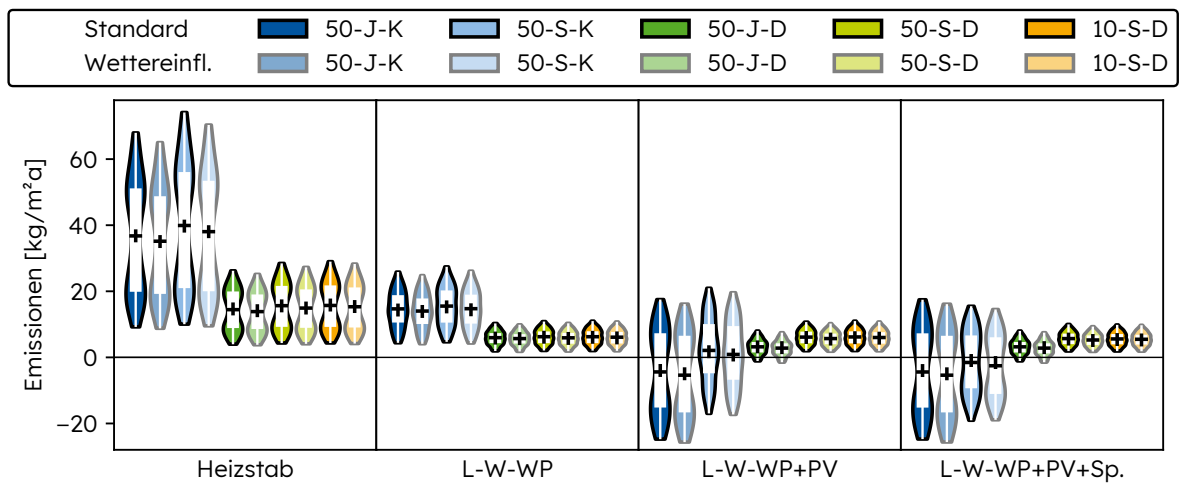


(a) Heizen

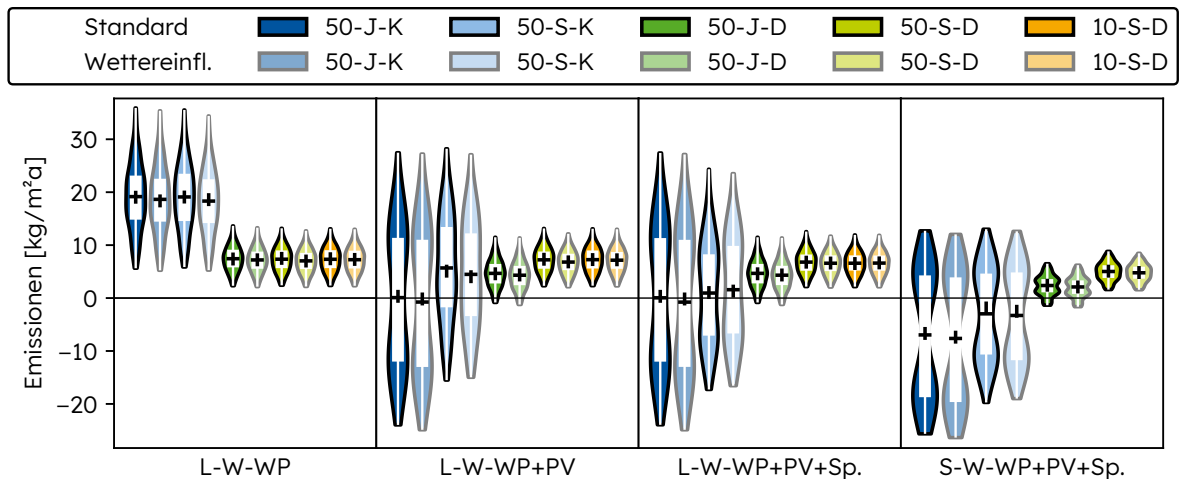


(b) Heizen + Kühlen

Abbildung B.8.: Optimale Dämmstärken für das Bildungsgebäude in Abhängigkeit von Betriebsfall (nur Heizen bzw. Heizen + Kühlen), Gebäude-technikvariante sowie den Modellierungsansätzen für den Stromsektor als Violinplots mit integriertem Boxplot für Optimierungen mit klimwandelangepassten Wetterdaten sowie nicht angepassten Wetterdaten (Wettereinfl. = Wettereinfluss)

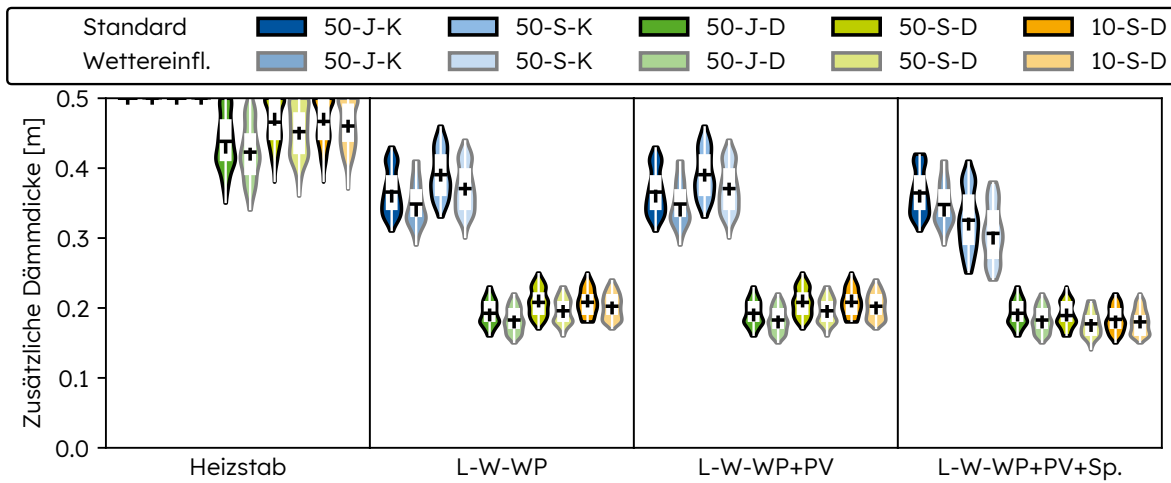


(a) Heizen

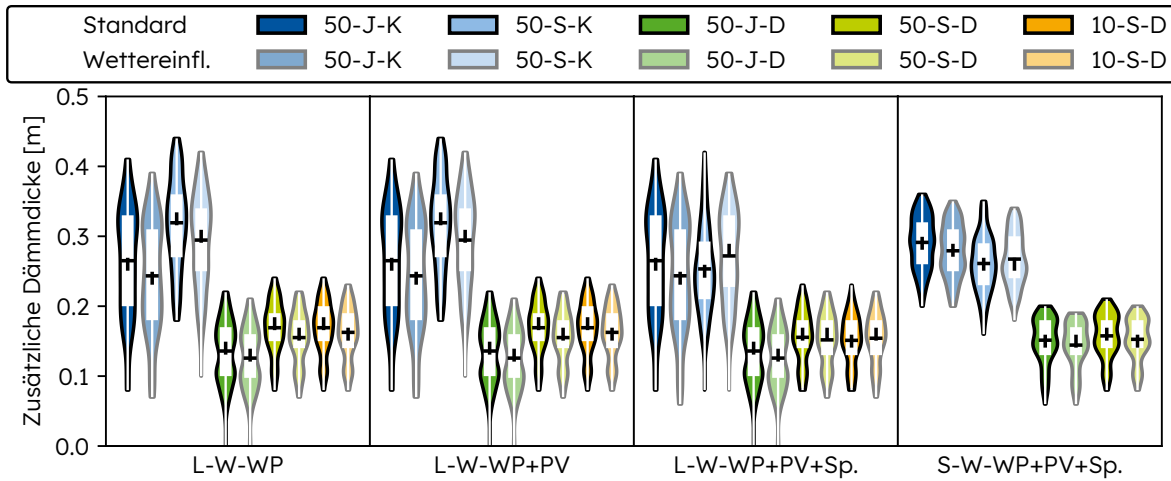


(b) Heizen + Kühlen

Abbildung B.9.: Optimale Emissionswerte für das Bürogebäude in Abhängigkeit von Betriebsfall (nur Heizen bzw. Heizen + Kühlen), Gebäudetechnikvariante sowie den Modellierungsansätzen für den Stromsektor als Violinplots mit integriertem Boxplot für Optimierungen mit klimawandelangepassten Wetterdaten sowie nicht angepassten Wetterdaten (Wettereinfl. = Wettereinfluss)

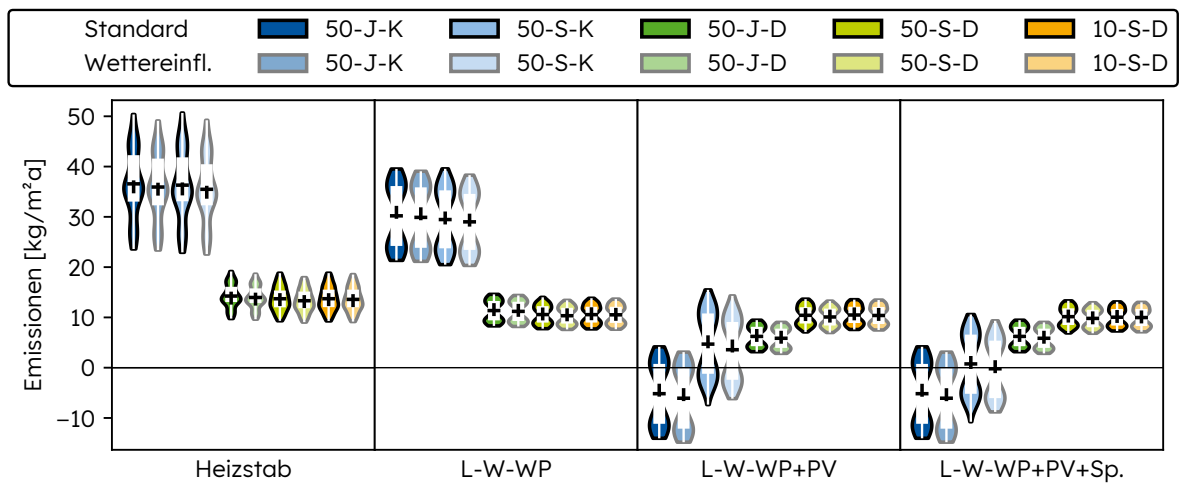


(a) Heizen

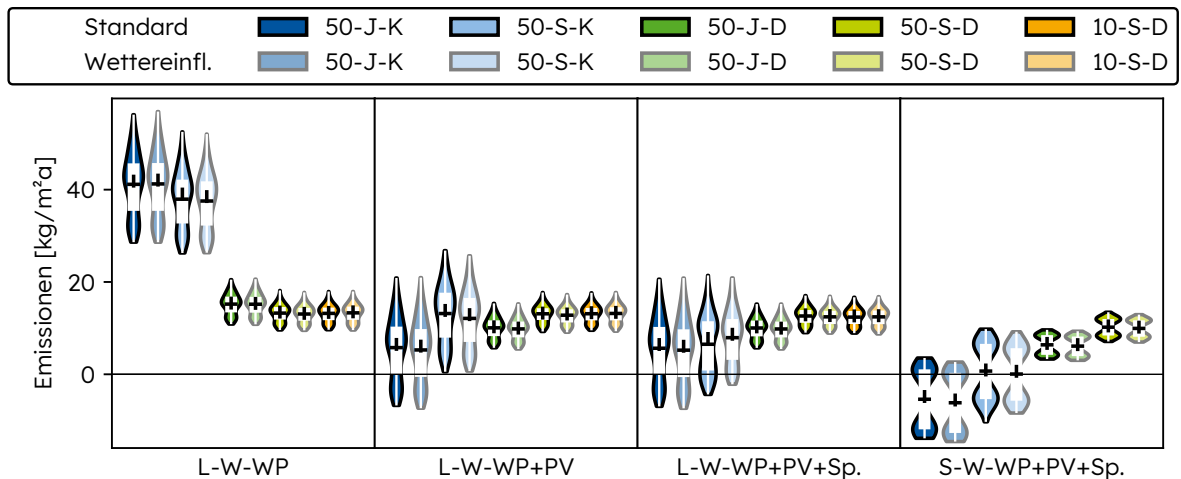


(b) Heizen + Kühlen

Abbildung B.10.: Optimale Dämmstärken für das Bürogebäude in Abhängigkeit von Betriebsfall (nur Heizen bzw. Heizen + Kühlen), Gebäudetechnikvariante sowie den Modellierungsansätzen für den Stromsektor als Violinplots mit integriertem Boxplot für Optimierungen mit klimawandelangepassten Wetterdaten sowie nicht angepassten Wetterdaten (Wettereinfl. = Wettereinfluss)

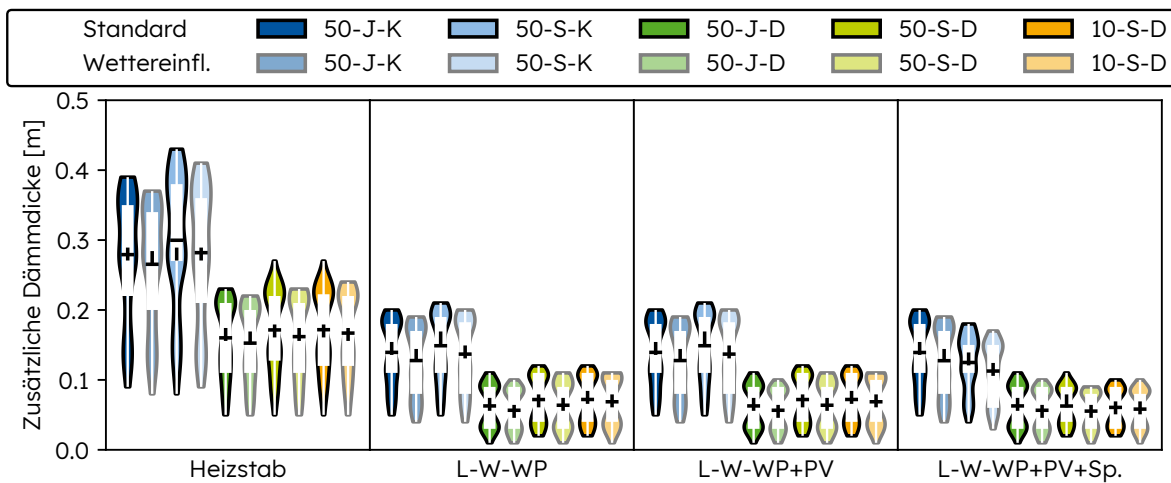


(a) Heizen

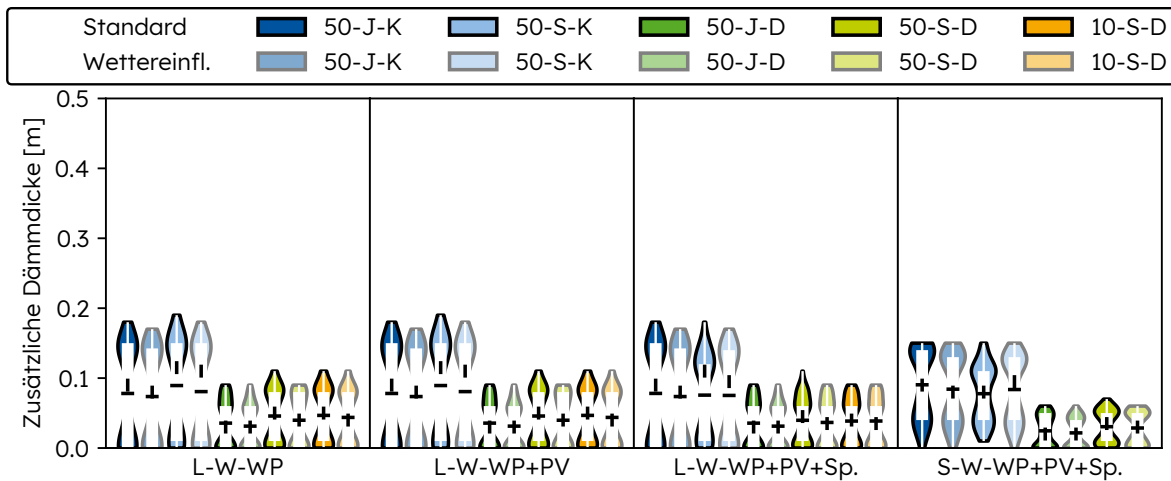


(b) Heizen + Kühlen

Abbildung B.11.: Optimale Emissionswerte für die Gewerbehalle in Abhängigkeit von Betriebsfall (nur Heizen bzw. Heizen + Kühlen), Gebäudetechnikvariante sowie den Modellierungsansätzen für den Stromsektor als Violinplots mit integriertem Boxplot für Optimierungen mit klimawandelangepassten Wetterdaten sowie nicht angepassten Wetterdaten (Wettereinfl. = Wettereinfluss)



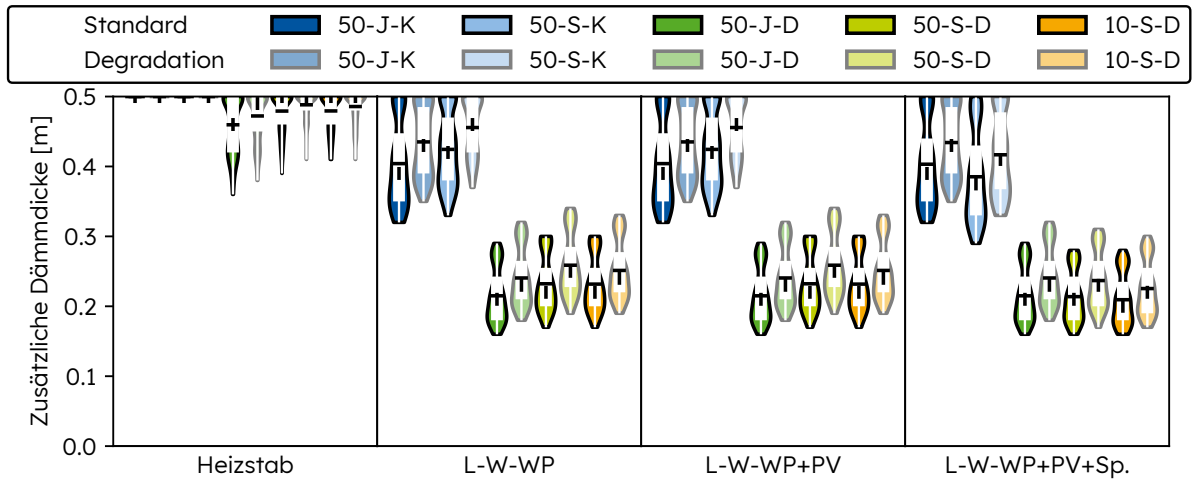
(a) Heizen



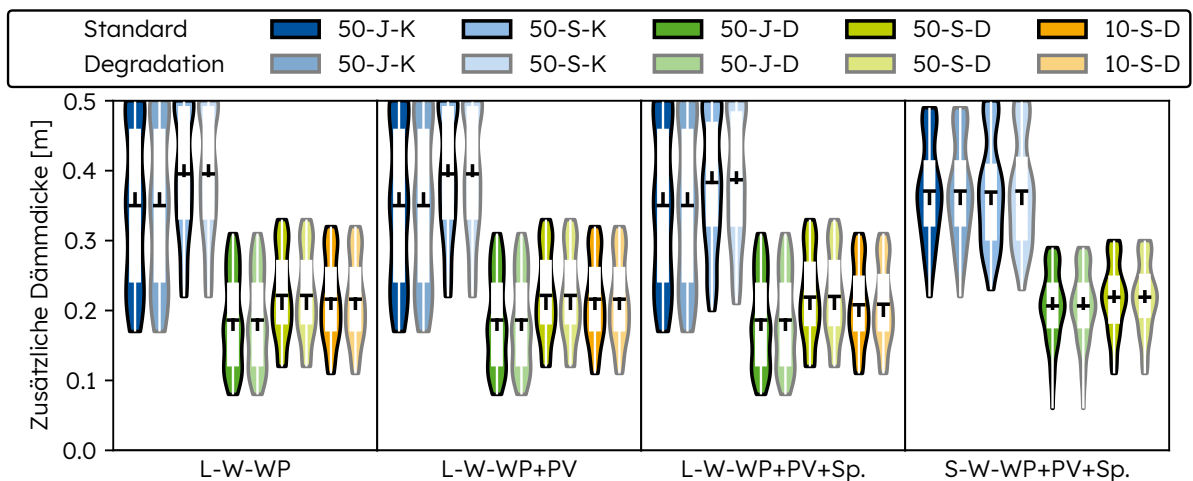
(b) Heizen + Kühlen

Abbildung B.12.: Optimale Dämmstärken für die Gewerbehalle in Abhängigkeit von Betriebsfall (nur Heizen bzw. Heizen + Kühlen), Gebäudetechnikvariante sowie den Modellierungsansätzen für den Stromsektor als Violinplots mit integriertem Boxplot für Optimierungen mit klimawandelangepassten Wetterdaten sowie nicht angepassten Wetterdaten (Wettereinfl. = Wettereinfluss)

## B.4. Einfluss der Degradation der Gebäudetechnik und Dämmung

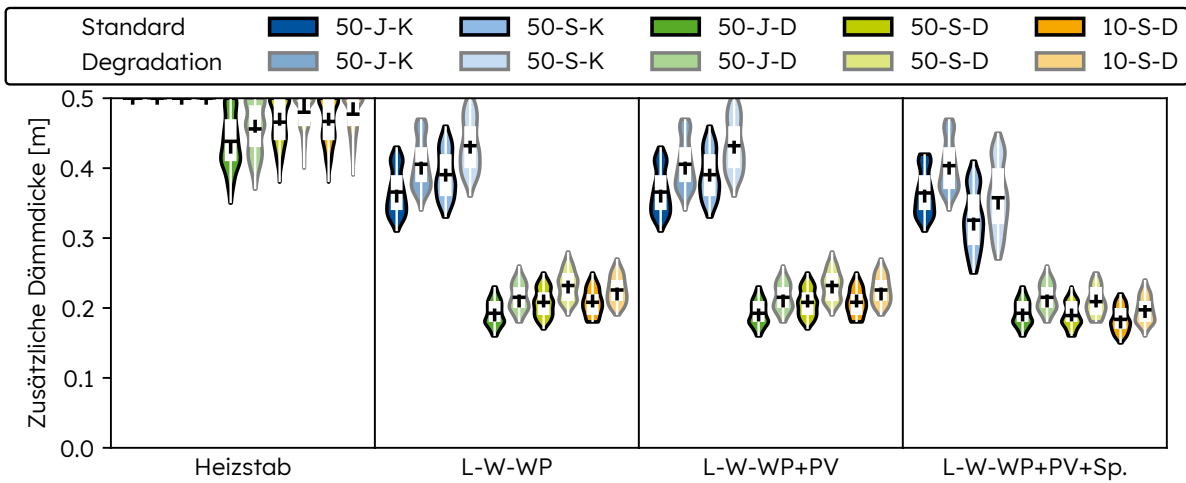


(a) Heizen

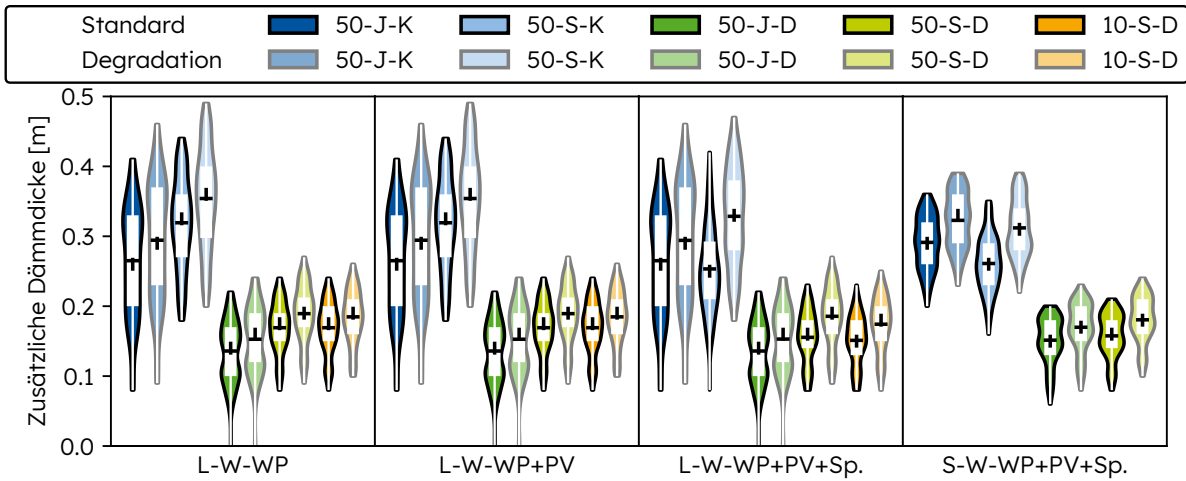


(b) Heizen + Kühlen

Abbildung B.13.: Optimale Dämmstärken für das Bildungsgebäude in Abhängigkeit von Betriebsfall (nur Heizen bzw. Heizen + Kühlen), Gebäudetechnikvariante sowie den Modellierungsansätzen für den Stromsektor als Violinplots mit integriertem Boxplot für Optimierungen mit Degradation der Gebäudetechnik und Dämmung sowie ohne Degradation

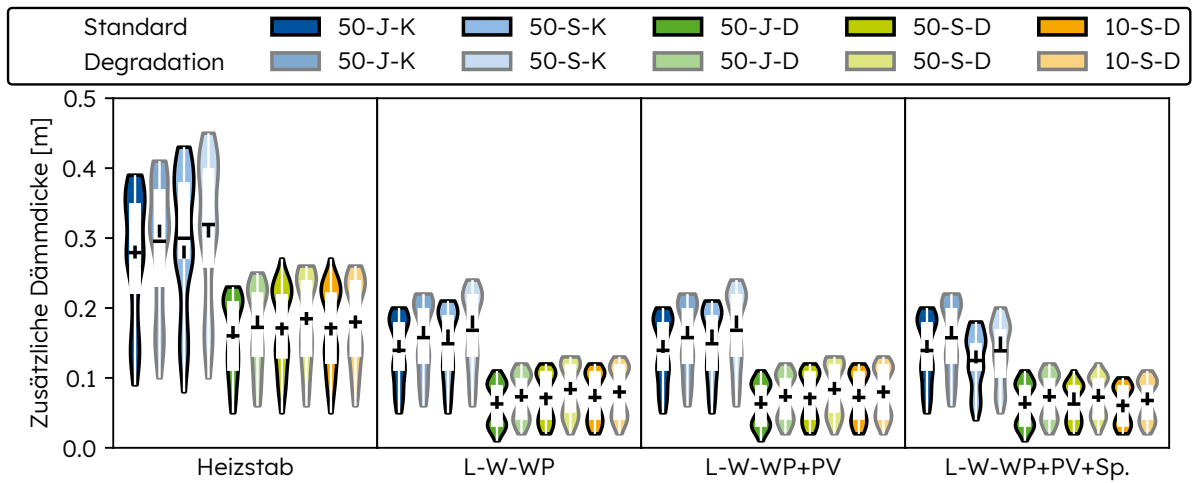


(a) Heizen

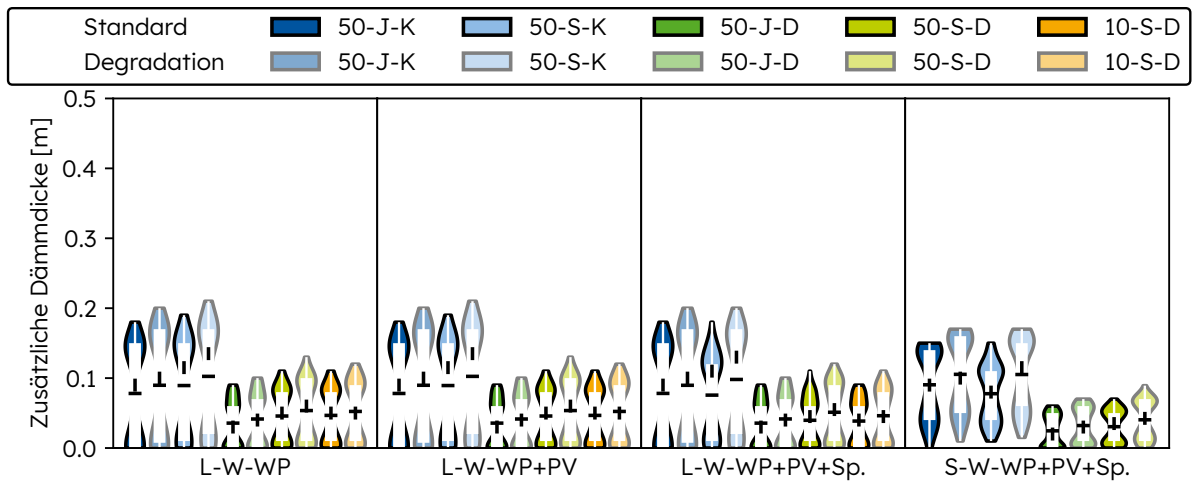


(b) Heizen + Kühlen

Abbildung B.14.: Optimale Dämmstärken für das Bürogebäude in Abhängigkeit von Betriebsfall (nur Heizen bzw. Heizen + Kühlen), Gebäudetechnikvariante sowie den Modellierungsansätzen für den Stromsektor als Violinplots mit integriertem Boxplot für Optimierungen mit Degradation der Gebäudetechnik und Dämmung sowie ohne Degradation



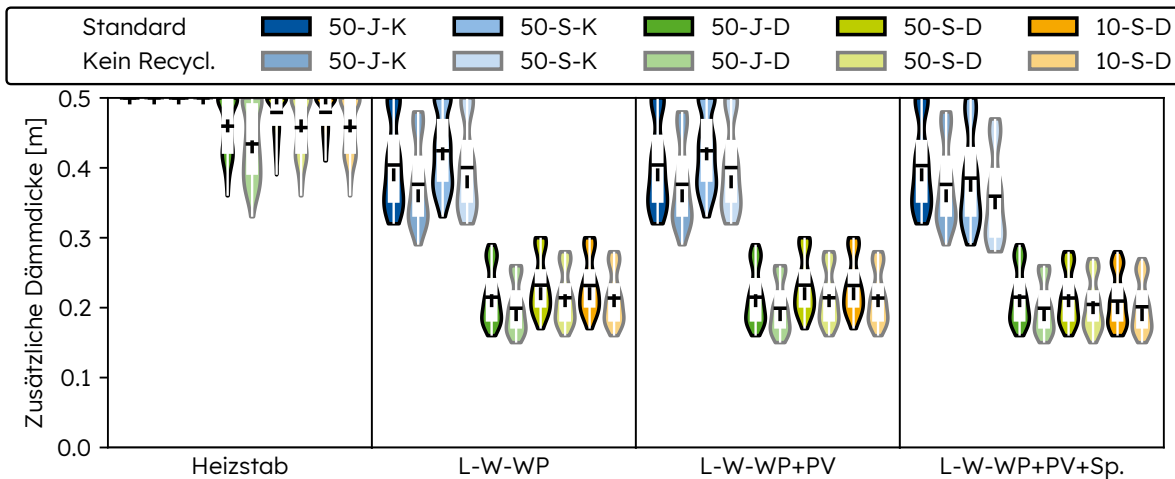
(a) Heizen



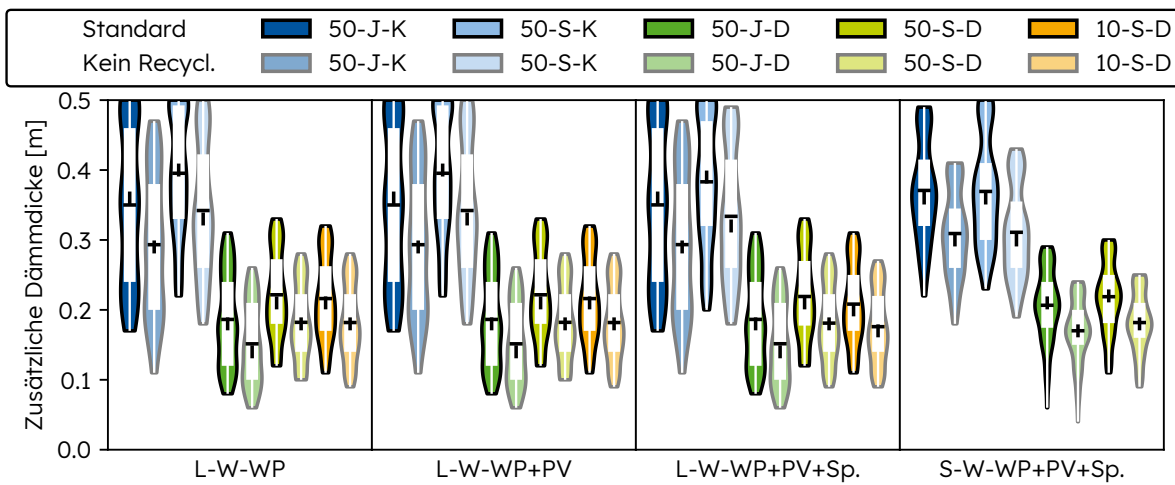
(b) Heizen + Kühlen

Abbildung B.15.: Optimale Dämmstärken für die Gewerbehalle in Abhängigkeit von Betriebsfall (nur Heizen bzw. Heizen + Kühlen), Gebäudetechnikvariante sowie den Modellierungsansätzen für den Stromsektor als Violinplots mit integriertem Boxplot für Optimierungen mit Degradation der Gebäudetechnik und Dämmung sowie ohne Degradation

## B.5. Einfluss der Berücksichtigung des Recyclingpotentials auf die Dämmstärke und Emissionen

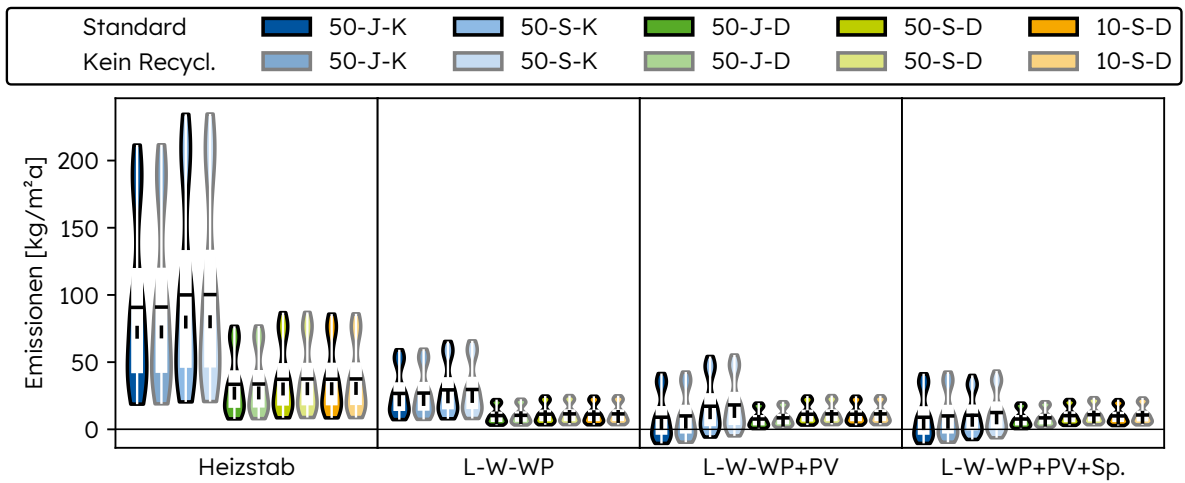


(a) Heizen

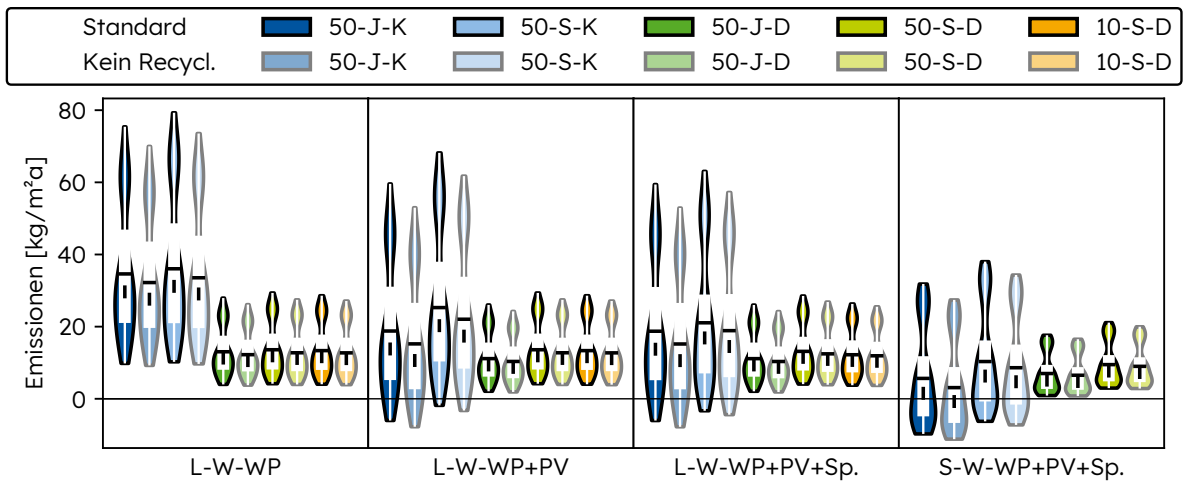


(b) Heizen + Kühlen

Abbildung B.16.: Optimale Dämmstärken für das Bildungsgebäude in Abhängigkeit von Betriebsfall (nur Heizen bzw. Heizen + Kühlen), Gebäudetechnikvariante sowie den Modellierungsansätzen für den Stromsektor als Violinplots mit integriertem Boxplot für Optimierungen mit und ohne Einfluss des Recyclingpotentials

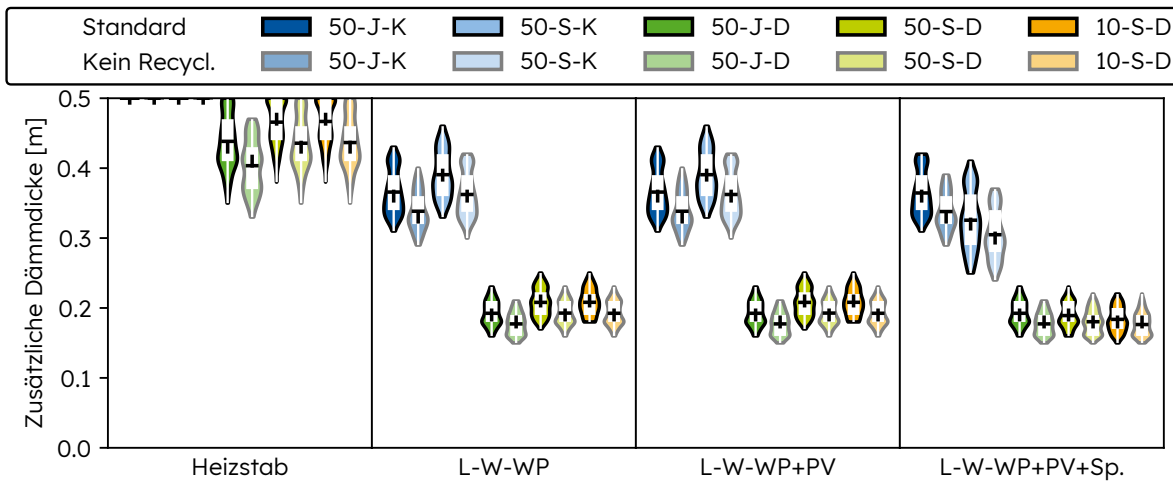


(a) Heizen

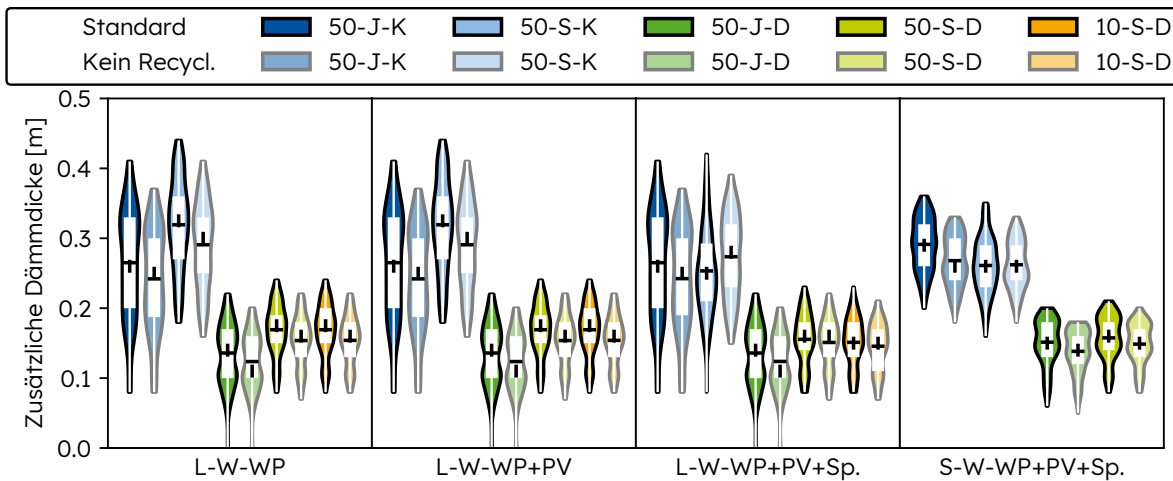


(b) Heizen + Kühlen

Abbildung B.17.: Optimale Emissionswerte für das Bildungsgebäude in Abhängigkeit von Betriebsfall (nur Heizen bzw. Heizen + Kühlen), Gebäudetechnikvariante sowie den Modellierungsansätzen für den Stromsektor als Violinplots mit integriertem Boxplot für Optimierungen mit und ohne Einfluss des Recyclingpotentials

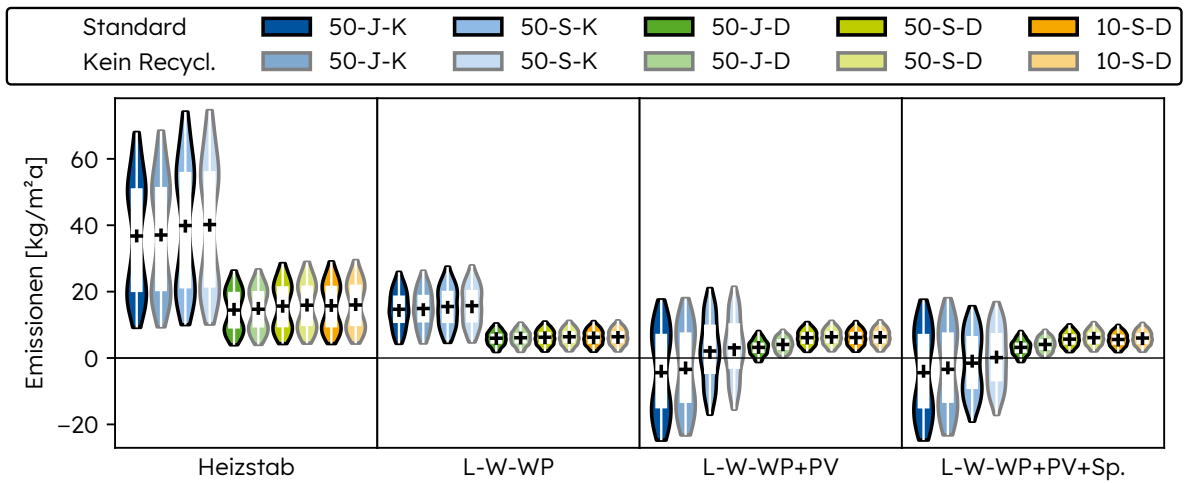


(a) Heizen

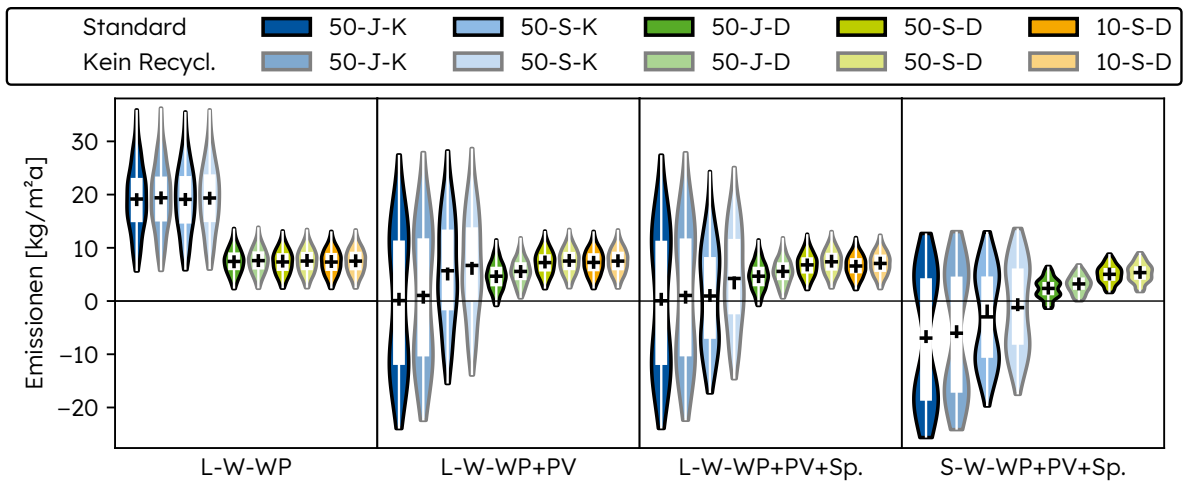


(b) Heizen + Kühlen

Abbildung B.18.: Optimale Dämmstärken für das Bildungsgebäude in Abhängigkeit von Betriebsfall (nur Heizen bzw. Heizen + Kühlen), Gebäudetechnikvariante sowie den Modellierungsansätzen für den Stromsektor als Violinplots mit integriertem Boxplot für Optimierungen mit und ohne Einfluss des Recyclingpotentials

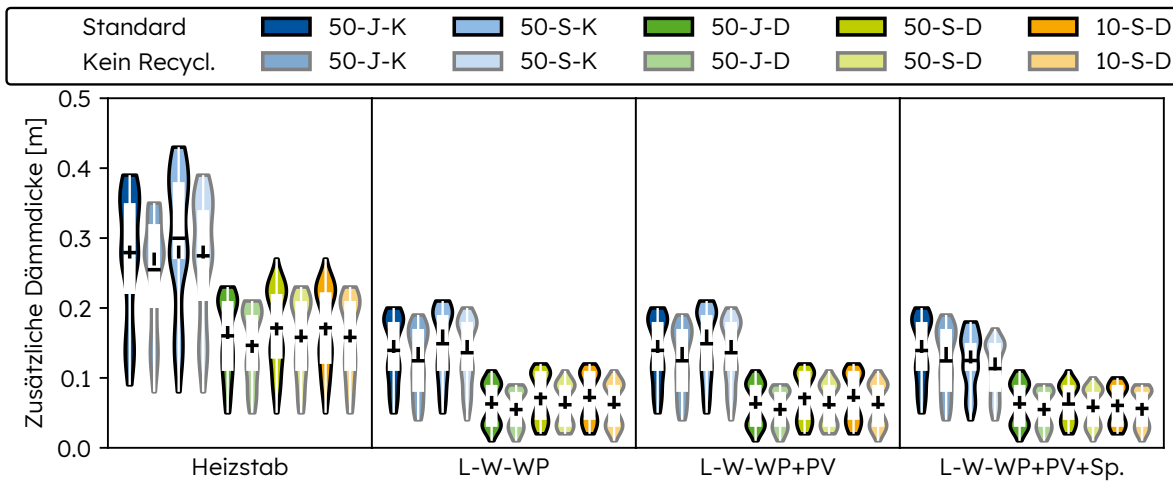


(a) Heizen

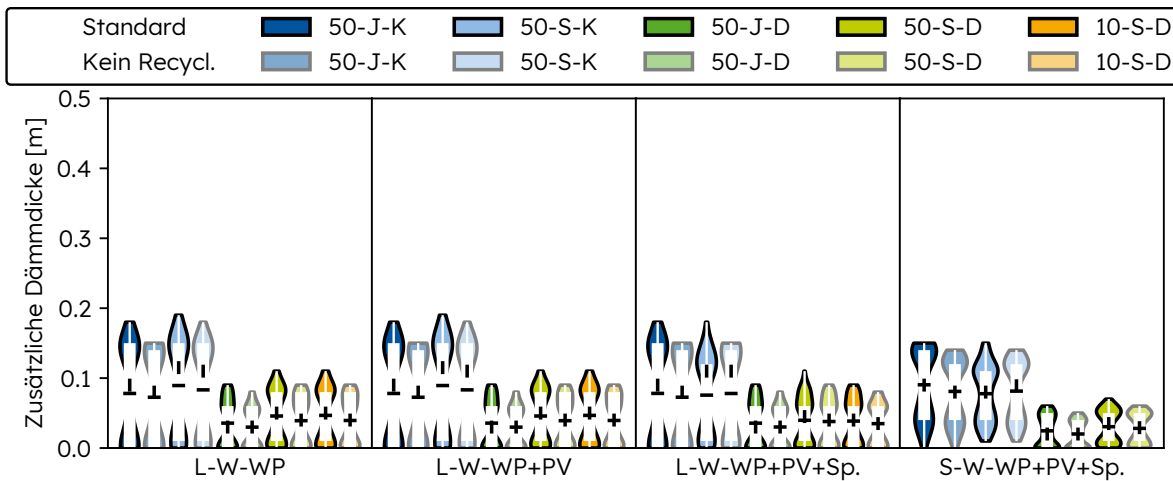


(b) Heizen + Kühlen

Abbildung B.19.: Optimale Emissionswerte für das Bürogebäude in Abhängigkeit von Betriebsfall (nur Heizen bzw. Heizen + Kühlen), Gebäudetechnikvariante sowie den Modellierungsansätzen für den Stromsektor als Violinplots mit integriertem Boxplot für Optimierungen mit und ohne Einfluss des Recyclingpotentials

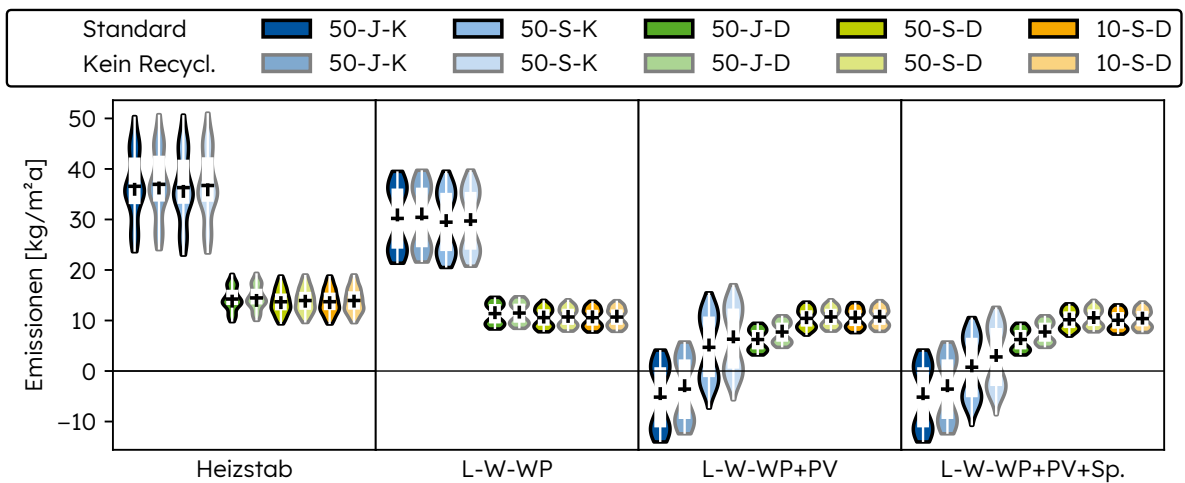


(a) Heizen

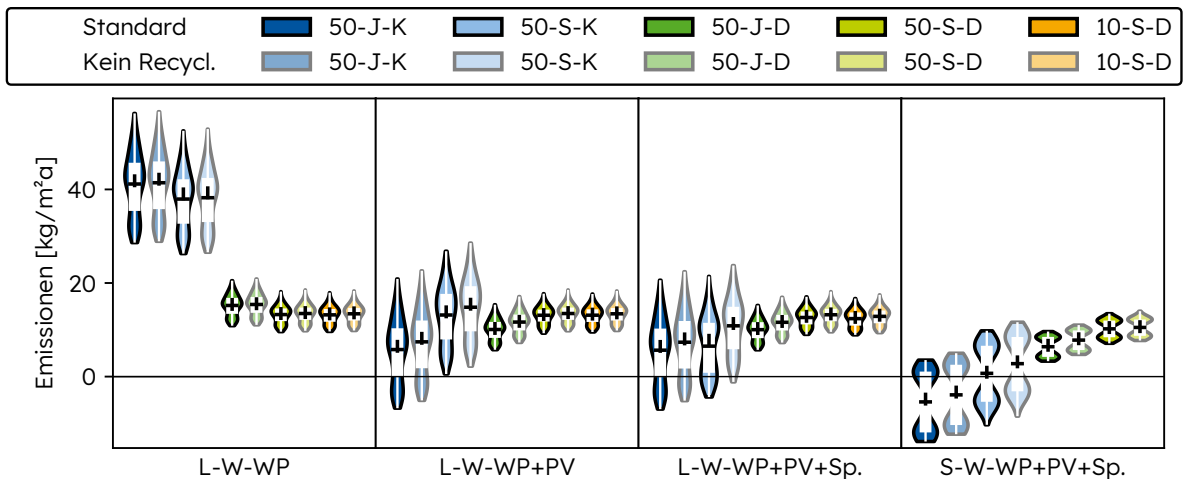


(b) Heizen + Kühlen

Abbildung B.20.: Optimale Dämmstärken für die Gewerbehalle in Abhängigkeit von Betriebsfall (nur Heizen bzw. Heizen + Kühlen), Gebäudetechnikvariante sowie den Modellierungsansätzen für den Stromsektor als Violinplots mit integriertem Boxplot für Optimierungen mit und ohne Einfluss des Recyclingpotentials



(a) Heizen



(b) Heizen + Kühlen

Abbildung B.21.: Optimale Emissionswerte für die Gewerbehalle in Abhängigkeit von Betriebsfall (nur Heizen bzw. Heizen + Kühlen), Gebäudetechnikvariante sowie den Modellierungsansätzen für den Stromsektor als Violinplots mit integriertem Boxplot für Optimierungen mit und ohne Einfluss des Recyclingpotentials