

Endbericht für das Projekt

BF2020 Begleitforschung Energiewendebauen-

Modul Gebäude

>>RokiG2050<<



Modulleitung: RWTH Aachen
E.ON Energy Research Center,
Lehrstuhl für Gebäude- und Raumklimatechnik
Prof. Dr.-Ing. Dirk Müller

Modulpartner: Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP
Abteilung Energieeffizienz und Raumklima
Prof. Dr. Gunnar Grün

Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsfor-
schung ISI
Abteilung Energiepolitik und Energiemärkte
Dr. Elisabeth Dütschke, Dr. Mahsa Bagheri

Laufzeit: 01. September 2020 bis 31. Dezember 2024

Datum: 12.05.2025

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Autoren

Univ. Prof. Dr.-Ing. Dirk Müller
Nico Fuchs, M.Sc.
Eva Bauer, M.Sc.
Dr. Jan Richarz
Amely Gundlach, M.Sc.
Dr. Tanja Osterhage
Yizhuo Zhang, M.Sc.
Dr. Laura Maier

Prof. Dr. Gunnar Grün
Dipl.-Ing. Heike Erhorn-Kluttig
Dipl.-Ing. (FH) Linda Lyslow
Jessica Preuss, M.Sc.
Dipl.-Ing. Jan Kaiser

Dr. Mahsa Bagheri
Dr. Heike Brugger
Şirin Alibaş, M.Sc.
Dr. Ewa Dönitz
Iska Brunzema, M.Sc.
Dr. Elisabeth Dütschke
Dr. Songmin Yu

RWTH Aachen
E.ON Energy Research Center
Lehrstuhl für Gebäude- und
Raumklimatechnik
Mathieustr. 10
D-52074 Aachen

Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP
Nobelstr. 12
70569 Stuttgart

Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI
Breslauer Straße 48
76139 Karlsruhe

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Danksagung

Das Forschungsprojekt **BF2020** wurde in der Zeit vom 01.09.2020 bis zum 31.12.2024 durch den Projektträger Jülich (PTJ) unter den Förderkennzeichen 03EWB002A und 03EWB002B betreut. Die Finanzierung erfolgte aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz, wofür wir uns herzlich bedanken.

Inhaltsverzeichnis

Danksagung	iv
Abbildungsverzeichnis.....	vii
Tabellenverzeichnis	x
1 Kurzdarstellung des Vorhabens.....	11
1.1 Aufgabenstellung	11
1.2 Voraussetzungen.....	12
1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens	13
1.4 Zusammenarbeit mit anderen Stellen	14
2 Eingehende Darstellung	15
2.1 Verwendung der Zuwendung und Vergleich der erreichten und vorgegebenen Ziele	15
2.2 Notwendigkeit und Angemessenheit der Arbeit	18
2.3 Verwertbarkeit der Ergebnisse im Sinne des fortgeschrittenen Verwertungsplans	18
2.4 Fortschritte auf dem gleichen Gebiet durch andere Stellen	21
2.5 Erfolgte und geplante Veröffentlichungen	22
2.5.1 Veröffentlichungen der Wissenschaftlichen Begleitforschung	22
2.5.2 Wissenschaftliche und studentische Arbeiten	25
2.5.3 Meilensteinberichte	26
3 Darstellung der wissenschaftlichen Arbeit.....	28
3.1 Arbeitspaket 1 (AP 1): Ergebnistransfer und Austauschformate.....	28
3.1.1 Projektetreffen und Workshops.....	30
3.1.2 Fokustreffen.....	32
3.1.3 Konferenzen.....	33
3.1.4 Modulinterner und modulübergreifender Austausch.....	34
3.2 Arbeitspaket 2 (AP 2): Akzeptanz und Partizipation	35
3.3 Arbeitspaket 3 (AP 3): Auswertung der F&E- Ergebnisse im Gebäudebereich.....	40
3.3.1 Projektcluster.....	42
3.3.2 Fragebögen der Begleitforschung	43
3.3.3 Glossar für Begrifflichkeiten aus dem Bereich Energieeffizienter Gebäude	48
3.3.4 Querauswertung zu Indikatoren.....	49
3.3.5 Querauswertung zu Lessons Learned aus den Projekten der Forschungsinitiative EWB	52
3.3.6 Leitfäden zur Ermittlung von Einspareffekten an Energie und klimaschädlichen Emissionen bei der Umsetzung von Forschungsvorhaben und deren Skalierung	54
3.4 Arbeitspaket 4 (AP 4): Bausteine für einen klimaneutralen Gebäudebestand 2050.....	60

Inhaltsverzeichnis

3.4.1	AP4.1: Energetische Gebäudesanierung als Kernbaustein der Energiewende	60
3.4.2	AP 4.2: Neubau als Innovationstreiber	72
3.4.3	AP 4.3: Smarter Gebäudebetrieb	77
3.4.4	AP 4.4: Integration des Einzelgebäudes in das Gesamtsystem	98
3.4.5	AP 4.5: Modernisierungsfahrpläne und Szenarienbetrachtung des Energiebedarfs des deutschen Gebäudebestandes.....	114
3.5	Arbeitspaket 5 (AP 5): Betrachtungen regulatorischer Rahmenbedingungen	134
4	Zusammenfassung.....	143
5	Literaturverzeichnis.....	145

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Kompetenzfelder der beteiligten Forschungsinstitute	12
Abbildung 2: Arbeitspakete mit Interdependenzen.....	13
Abbildung 3: Verteilung der dem Modul II zugeordneten Vorhaben auf unterschiedliche Projekttypen. Dabei wurden aktuelle Projekte und Projekte, die seit weniger als einem Jahr ausgelaufen sind, zum Zeitpunkt Ende 2024 betrachtet.	42
Abbildung 4: Ausschnitt aus der Übersichtsversion des Projektclusters.	43
Abbildung 5: Anzahl der dem BF-Modul II zugeordneten Projekte, die den jeweiligen Themenblock beantwortet haben. An der modulübergreifenden Befragung im Jahr 2021 nahmen von insgesamt 164 dem BF-Modul II zugeordneten Projekte 53 % der Projekte teil. Bei 75 Projekten handelte es sich um Gebäudeprojekte, bei drei um Quartiersprojekte und bei neun weder um ein Gebäude- noch um ein Quartiersprojekt.	45
Abbildung 6: Aufbau des M2-Cluster-Fragebogens mit der Reihenfolge der abgefragten Themenbereiche.	46
Abbildung 7: Themenfelder und die gestellten Fragen seitens BF-Modul II im Rahmen der Expert:Innen-Befragung.	47
Abbildung 8: Übersicht über die Themenbereiche, die von Begrifflichkeiten des Energiewendebauen-Glossars abgedeckt werden. Quelle: eigene Darstellung.....	49
Abbildung 9: Gestaltung der Indikatorlisten am Beispiel eines Ausschnitts (hier Emissionen und Energiebedarf).....	50
Abbildung 10: Aufbau und Gliederung des Indikator-Steckbriefs.....	51
Abbildung 11: Verwendete Kategorien zur Erfassung und Einteilung von Lernerfahrungen (Lessons Learned), die innerhalb von Projekten der Forschungsinitiative Energiewendebauen gemacht wurden. Quelle: eigene Darstellung.....	53
Abbildung 12: Lernerfahrungen der Projekte je Themenbereich gemäß den Umfrageergebnissen des Fragebogens der Wissenschaftlichen Begleitforschung 2021 und der Expertenbefragung 2022. Quelle: eigene Darstellung.....	54
Abbildung 13: Auswertung des Fragebogens der Wissenschaftlichen Begleitforschung im Themenbereich der Einsparpotenziale der Forschungsprojekte. Quelle: eigene Darstellung.	55
Abbildung 14: Erforderliche Schritte für die Bestimmung des Einsparpotenzials an Energie und klimaschädlichen Emissionen durch die Projekte im Bereich Gebäude aus der Forschungsinitiative Energiewendebauen.	56
Abbildung 15: Titelblatt des Leitfadens für den Projekttyp Technologieentwicklung und -einsatz zur Ermittlung von Einspareffekten an Energie und Klimaschädlichen Emissionen.	57
Abbildung 16: Superstruktur des Optimierungsmodells.	61
Abbildung 17: Validierung der Bedarfsberechnung im Optimierungsmodell zur Ermittlung von Sanierungsmaßnahmen.....	62
Abbildung 18: Generierung von Modernisierungsfahrplänen für verschiedene Gebäudearchetypen als Input für ein Portfoliooptimierungsmodell. Quelle: eigene Darstellung.	63
Abbildung 19: Identifizierte Einflüsse auf die Gebäudemodernisierung auf Basis des Screenings von Projektberichten.....	64
Abbildung 20: Höhe der Einflüsse unterschiedlicher Kategorien auf die Sanierungsentscheidung basierend auf der Expertenbefragung	65
Abbildung 21: Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse	66
Abbildung 22: Energiesystem des Modernisierungsfahrplans.....	67
Abbildung 23: Investitionen und Emissionen des berechneten Modernisierungsfahrplans	67
Abbildung 24: CO ₂ -Vermeidungskosten der Modernisierung unterschiedlicher Gebäudetypen.....	68
Abbildung 25: Ergebnisse für Modernisierungsfahrpläne bei beschränkten Handwerkskapazitäten..	70

Inhaltsverzeichnis

Abbildung 26: Realisierungszeiten von Modernisierungsmaßnahmen basierend auf den geführten Handwerksinterviews. Abkürzungen: flach (f), steil (s), klein (k), groß (g), Pelletkessel (PK), Blockheizkraftwerk (BHKW), Fernwärme (FW), Luft-Wasser-Wärmepumpe (WPl/w), Geothermie-Wärmepumpe (WPgeo), Kompressionskältemaschine (KKM), Batterie (BAT), Warmwasserspeicher (WWS).....	71
Abbildung 27: Spanne der Technology Readiness Levels innovativer Technologien der EWB-Forschungsprojekte während der Projektlaufzeit. Quelle: eigene Darstellung.	74
Abbildung 28: Darstellung der Indexreihen „KG 300: Bauwerk – Baukonstruktionen“ und „KG 400: Bauwerk – Technische Anlagen“ im Vergleich zum Verbraucherpreisindex VPI. Quelle: [37].	75
Abbildung 29: Darstellung der Indexreihen Strom, Gas, Heizöl und feste Brennstoffe im Vergleich zum Verbraucherpreisindex VPI. Quelle: eigene Darstellung mit Daten von [39].....	76
Abbildung 30: Zuordnung der kosteneffizienten Lösungen der EWB-Projekte in unterschiedliche Themenfelder mit jeweiligem Anteil. Insgesamt gaben 76 Projekte an kostengünstige oder kostensparende Lösungen zu beinhalten. Quelle: eigene Darstellung.	77
Abbildung 31: Schnittmenge zwischen Betriebsüberwachungssystemen und smarten Technologien innerhalb auswertbarer EWB-Vorhaben, sowie Forschungsfokus in den Vorhaben.....	80
Abbildung 32: Angaben der befragten Teilnehmer:Innen hinsichtlich des Methodeneinsatzes für die Betriebsoptimierung. Quelle: eigene Darstellung.....	81
Abbildung 33: Optimierungsziele innerhalb der befragten Verbundvorhaben (n = 27). Quelle: eigene Darstellung.	82
Abbildung 34: Art der Daten, notwendige Metadaten und prinzipieller Prozess zur Identifikation der Lastprofile innerhalb der Monitoring-Datenbank. Quelle: eigene Darstellung.	84
Abbildung 35: Darstellung eines Energieflussschemas in Anlehnung an [52]. Das Messkonzept eines fiktiven Demonstrationsvorhabens wird ausgehend vom Energieeinsatz bis zur Energiedeckung dokumentiert. Die Zählerpositionen sind dabei leicht identifizierbar.	85
Abbildung 36: Fehlerrate der Teilkomponenten einer RLT-Anlage im Zeitraum von sieben Jahren. Die Anzahl der dokumentierten Fehler betrug insgesamt: 6.398. Quelle: [79].	91
Abbildung 37: Abstufung der SRI-Klassen in Abhängigkeit der Gesamt-SRI-Punktzahl. Quelle: eigene Darstellung.	96
Abbildung 38: Aufbau vom MILP-Modell zur quantitativen Bewertung netzdienlichen Gebäudekonzepte.	108
Abbildung 39: Übersicht der untersuchten Zielfunktionen und Ladestrategien in der modellbasierten Analyse in [100].	109
Abbildung 40: Annualisierte (Ann.) Kosten und jährliche Betriebsemissionen von typischen netzdienlichen Gebäudeenergiesystemen in der Forschung für eine Anwendung in einem Mehrfamilienhaus.	113
Abbildung 41: Werte der Netzdienlichkeitsindikatoren für die typischen netzdienlichen Gebäudekonzepte aus der Forschung.....	113
Abbildung 42: Zweistufiger Ansatz zur Erstellung von Modernisierungsfahrplänen auf Portfolioebene.	116
Abbildung 43: Paretofront der Optimierung des deutschen Gebäudebestands mit unbegrenzter Verfügbarkeit von Handwerker*innen und Investitionsbudgets.....	117
Abbildung 44: Analyse der Priorisierung von Baualtersklassen und Klimaregionen innerhalb der Portfoliooptimierung. Erläuterung der Abkürzungen: EFH-Einfamilienhaus, Rest.-Restaurant, MFH-Mehrfamilienhaus, KH-Krankenhaus.....	117
Abbildung 45: Schema des Ansatzes für die Szenarienmodellierung in AP 4.5.	118
Abbildung 46: Arbeitsablauf von RENDER-Building	125

Abbildung 47: Entwicklung des Endenergiebedarfs des deutschen Gebäudesektors gemäß den Szenarien STS, CTS und LTS. Der in dieser Abbildung dargestellte Endenergiebedarf schließt die für Wärmepumpen verwendete Umgebungswärme aus.	127
Abbildung 48: Durchschnittliche bauteilflächenbezogene Sanierungsrate von Gebäuden gemäß den Szenarien STS, CTS und LTS	128
Abbildung 49: Entwicklung der direkten CO ₂ -Emissionen des deutschen Gebäudesektors gemäß den Szenarien STS, CTS und LTS	129
Abbildung 50: Screenshot vom Tool	131
Abbildung 51: Exemplarische Sicht der Deutschlandkarte: Die CO ₂ -Emissionen basierend auf Erdgas für die Raumwärme im Gebäudesektor (WG und NWG) im Szenario B für die Jahre 2020 (links) und 2045 (rechts)	133
Abbildung 52: Exemplarische Sicht des Liniendiagramms: Die Entwicklung der CO ₂ -Emissionen basierend auf Erdgas für die Raumwärme im Gebäudesektor (WG und NWG) in allen Szenarien zwischen 2020 und 2050.	133
Abbildung 53: Häufigste Arten regulatorischer Hemmnisse in Forschungsprojekten	137
Abbildung 54: Aufbau des Berechnungsmodells.....	138
Abbildung 55: Ergebnisse am Fallbeispiel eines Einfamilienhauses.....	138
Abbildung 56: Technikwahl im typischen Einfamilienhaus unter verschiedenen Energiepreisszenarien	139
Abbildung 57: Technikwahl im typischen Einfamilienhaus unter verschiedenen Fördersätzen.....	140
Abbildung 58: Schematische Struktur des zweistufigen Optimierungsmodells zur Ermittlung optimierter Förderraten.	140
Abbildung 59: Wirtschaftliche Technologiewahl hinsichtlich totaler Kosten in zwei typischen Einfamilienhäusern unterschiedlicher Dämmstandards unter veränderlichen Fördersätzen. Die normierten Kosten beziehen sich jeweils auf den Referenzfall ohne Förderung.	141
Abbildung 60: Vergleich der Technologiewahl sowie der resultierenden Kosten und Emissionen im vermieteten Mehrfamilienhaus mit und ohne neu eingeführte Elemente des Mietrechts (CO ₂ Preisverteilung, Mieterstrom, energetische Differenzierung von Mietspiegeln) in zwei Preisszenarien	142

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Veröffentlichungen in wissenschaftlichen Papieren	22
Tabelle 2: Thematische Querauswertungen und Beiträge zur EWB-Forschung	24
Tabelle 3: Übersicht über die veröffentlichten Veranstaltungsberichte.....	25
Tabelle 4: Liste der betreuten Abschlussarbeiten.....	25
Tabelle 5: Übersicht über die gelieferten Deliverables.....	26
Tabelle 6: Übersicht über die Vorgaben zur Ermittlung der Einspareffekte an Energie und klimaschädlichen Emissionen bei der Umsetzung der Forschungsvorhaben.	58
Tabelle 7: Umwandlung der Zählernamen aus einem Monitoringkonzept (Energieflussschema) in BUDO-konforme Messstellenbezeichnungen.	86
Tabelle 8: Auflistung der notwendigen Metadaten für die Ermittlung von Lastprofilen.....	87
Tabelle 9: Querauswertungsergebnisse zur Forschung im Bereich robuster Gebäudebetrieb.	93
Tabelle 10: Übersicht über die bewerteten Demonstrationsgebäude mit Darstellung der erreichten SRI-Punktzahlen und der daraus resultierenden SRI-Klassen.	96
Tabelle 11: Definitionsmatrix von Netzdienlichkeit im Gebäudebereich.	101
Tabelle 12: Auswertung BF-Fragebogen: Meinung der Forschungsprojekte zu möglichen Auswirkungen auf das Stromnetz eines netzdienlichen Gebäudes (Anzahl der Antworten: 77)	101
Tabelle 13: Auswertung BF-Fragebogen: Meinung der Forschungsprojekte zu technischen Optionen zur Gestaltung netzdienlicher Gebäudeenergiesysteme (Anzahl der Antworten: 80).	103
Tabelle 14: Querauswertung zu den Flexibilitäts- und Speicheroptionen in den Forschungsprojekten	103
Tabelle 15: Übersicht der betrachteten typischen Gebäude	107
Tabelle 16: Optimierte netzdienliche (Netzdienlich) und kostenminimierte (Referenz) Gebäudeenergiesysteme für vier typische Gebäudearten. BBHKW steht für Biogas-Blockheizkraftwerk, WP für Wärmepumpe, EH für Elektroerhitzer, PV für Photovoltaik, STA für Solarthermieranlagen, TES für thermische Energiespeiche und BAT für Batteriespeicher. „-“ steht dafür, dass diese Anlage nicht in dem Gebäudeenergiesystem betrachtet wurde.	111
Tabelle 17: Typische netzdienliche Gebäudeenergiesysteme aus der Forschung. Die Anlagegrößen resultieren aus der Auslegungsoptimierung an einem vordefinierten typischen Mehrfamilienhaus. BBHKW steht für Biogas-Blockheizkraftwerk, WP für Wärmepumpe, EH für Elektroerhitzer, PV für Photovoltaik, STA für Solarthermieranlagen, TES für thermische Energiespeicher und BAT für Batteriespeicher. „-“ steht dafür, dass diese Anlage nicht in dem Gebäudeenergiesystem betrachtet wurde.	112
Tabelle 18: Ergebnisse der STEEP-Analyse	119
Tabelle 19: Schlüsselfaktoren - Klimaneutraler Gebäudebestand 2045	120
Tabelle 20: Beispiel für einen Schlüsselfaktor mit seinen Ist-Situation und den zukünftigen Annahmen	121
Tabelle 21: Beschreibung der Szenarien nach den thematischen Kategorien.....	123
Tabelle 22: Szenarioannahmen unter relevanten Aspekten und Umgang im Modell (Merkmal)	126
Tabelle 23: Auswahlmöglichkeiten für den Szenariengenerator	132

1 Kurzdarstellung des Vorhabens

1.1 Aufgabenstellung

Das Vorhaben im Rahmen der Wissenschaftlichen Begleitforschung Energiewendebauen (EWB) zielte darauf ab, zentrale Aspekte der Energiewende im Gebäudebereich zu erforschen und praxisnah zu unterstützen. Grundlage bildeten dabei die **Forschungsergebnisse der zugeordneten Gebäudeprojekte**, die durch **Querauswertungen** analysiert und mit eigenen **forschungsgestützten Analysen** ergänzt wurden. Diese Ergebnisse sollten anschließend mit den beteiligten Projekten gespiegelt werden, um einen kontinuierlichen Austausch und eine Verbesserung der Forschungsergebnisse zu gewährleisten. Durch diese umfassenden Auswertungen sollten Erkenntnisse gewonnen werden, die zur Entwicklung von Strategien und innovativen Lösungen für eine klimaneutrale Gebäudewirtschaft beitragen.

Ein wesentlicher Fokus sollte auf der **energetischen Gebäudesanierung** liegen, die als entscheidender Hebel zur Reduzierung des Energieverbrauchs und zur Erreichung der nationalen Klimaziele gilt. Für verschiedene Gebäudetypen sollten ganzheitlich optimierte Sanierungs- und Modernisierungsmaßnahmen erarbeitet werden, einschließlich konkreter Fahrpläne zur Umsetzung. Diese Ansätze sollten sowohl technische als auch wirtschaftliche Randbedingungen berücksichtigen, wobei das **Nutzungsverhalten** ebenfalls in den Blick genommen werden sollte.

Im **Neubaubereich** sollte der „**Neubau als Innovationstreiber**“ betrachtet werden. Hier lag der Schwerpunkt auf der Identifikation und Aggregation kostengünstiger und innovativer Lösungen aus den geförderten Forschungsvorhaben.

Smarte Gebäudetechnologien und Regelungen zur Steuerung von Energieflüssen sollten eine weitere zentrale Rolle in den Analysen spielen. Die energetischen Potenziale dieser Technologien sollten bewertet werden. Durch die Erstellung und Integration von Messdaten aus den Forschungsprojekten in eine **Lastprofilatenbank** sollte zur konsistenten Weiternutzung von Forschungsergebnissen beigetragen werden.

Ein weiterer Schwerpunkt des Vorhabens sollte in der **Integration von Einzelgebäuden in das Gesamtsystem** liegen. Um Effizienzpotenziale zu maximieren, sollten Gebäude nicht isoliert, sondern als Teil eines größeren Energiesystems betrachtet werden. Verschiedene Gebäudeenergiesysteme und Betriebsstrategien sollten dabei in Bezug auf **Netzdienlichkeit** untersucht werden, um Synergien zwischen Gebäuden und Energiesystemen zu identifizieren.

Parallel zu den technischen Optimierungen sollte ein Fokus auf der **Nutzer:Innen-Akzeptanz** und dem **Nutzer:Innen-Verhalten** liegen. Diese Faktoren sind mitentscheidend für den Erfolg von Effizienzmaßnahmen. Durch die Einbindung relevanter Akteur:Innen sollten spezifische **Erfolgsfaktoren** und **Hemmnisse** identifiziert werden. Insbesondere Hemmnisse und Chancen im Bereich der Einbindung der Wohnungswirtschaft in den Forschungsbereich EWB sollten durch regelmäßige Austauschtreffen diskutiert und in der Folge systematisch analysiert werden.

Die gewonnenen [1] Erkenntnisse aus den laufenden Forschungsprojekten sollten durch **Szenarienbetrachtungen** modelliert und skaliert werden, um das **Einsparpotenzial** des gesamten deutschen Gebäudebestands zu ermitteln. Diese Ergebnisse sollten durch **Webvisualisierungen** öffentlich zugänglich gemacht werden, sodass der Wissenstransfer zwischen den Projekten und der breiten Öffentlichkeit gefördert wird. Ergänzend dazu sollten Veranstaltungsformate wie Projekttreffen, Webinare und Fachartikelreihen und weitere Veröffentlichungen zur Verbreitung der Forschungsergebnisse beitragen.

1.2 Voraussetzungen

Das Konsortium zur Erreichung dieser Ziele bestand zum einen aus Expert:Innen mit langjähriger Erfahrung im Bereich der Begleitforschung von Gebäuden, die auch Mitglied der vorherigen Wissenschaftlichen Begleitforschung Energiewendebauen waren (EBC, IBP) und wurde zur Ausweitung des thematischen und methodischen Portfolios um Expert:Innen aus den Bereichen der Systemmodellierung, Szenarienbetrachtung sowie der Partizipationskonzepte erweitert (ISI). Die Kompetenzfelder der beteiligten Institute sind in Abbildung 1 dargestellt und folgend anhand bisheriger Tätigkeiten im Detail beschrieben.

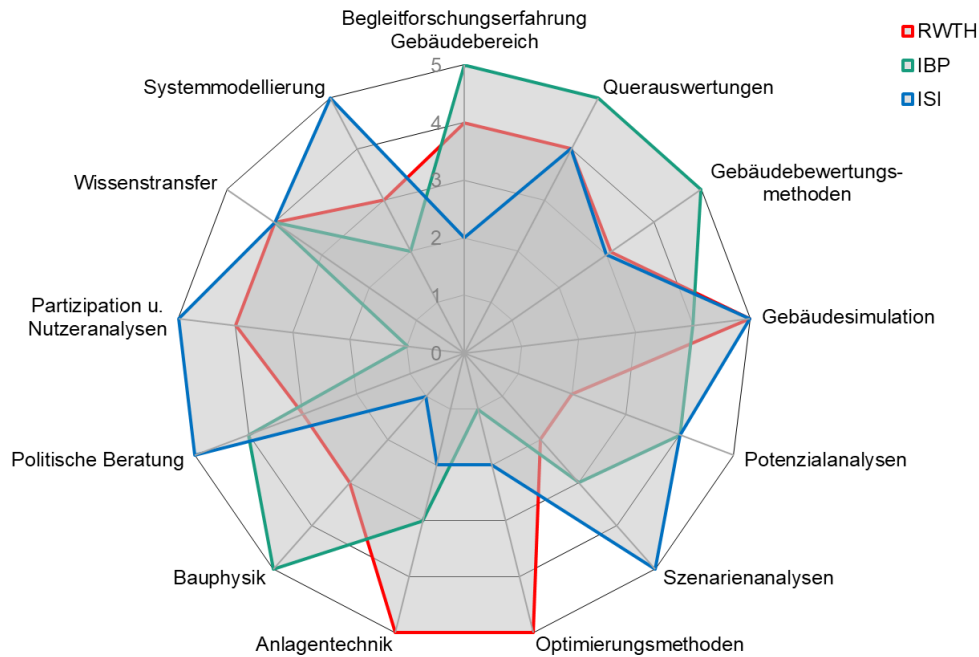


Abbildung 1: Kompetenzfelder der beteiligten Forschungsinstitute

Der **Lehrstuhl für Gebäude- und Raumklimatechnik** ist Teil des E.ON Energieforschungszentrums der RWTH Aachen University und beschäftigt sich mit Fragestellungen aus dem Bereich der Gebäudeenergie-technik. Ziele der Forschungsaktivitäten dieses Instituts sind die Verminderung des Energieverbrauchs von Gebäuden und die Erhöhung der Innenraumqualität. Dabei umfasst die energetische Betrachtung von Gebäuden die Energieerzeugung und deren Verteilung, die Energiespeicherung und deren Übergabe an den Raum sowie das thermische Verhalten des Baukörpers. Das Zusammenspiel von Maßnahmen an Gebäudehülle und Anlagentechnik zur Steigerung der Energieeffizienz von Gebäuden steht dabei im Kontext von energetischen Quartiersansätzen mit der Kopplung von thermischen und elektrischen Netzen.

Die Anwendung bauphysikalischer Grundsätze ist das Fundament der Forschungs- und Entwicklungsarbeit des **Fraunhofer-Instituts für Bauphysik IBP**. Neben klassischen bauphysikalischen Themen wie Akustik, Energieeffizienz, Raumklima, Hygiene, Baustoffrecycling sowie Hygrothermik forscht das Institut an Vorhaben mit hoher gesellschaftlicher Relevanz. So geht es u. a. darum, Schulen oder Arbeitsräume integral zu gestalten, das Fliegen umweltfreundlicher zu machen oder das energetische Potenzial ganzer Städte auszuloten. Im Fokus stehen energetische Fragestellungen zu Gebäuden und Siedlungen, die Entwicklung effizienter Gebäudesysteme sowie Maßnahmen zur Bedarfsminimierung unter Einbeziehung erneuerbarer Energien. Dies geht einher mit der Entwicklung von Kriterien für ein Nutzer:Innen- und nutzungsgerechtes Raumklima in Innenräumen. Es werden Niedrigstenergie-, Null-Emissions- und Plusenergiehäuser konzipiert, betreut und bewertet, sowohl im Neubau als auch im

Bestand, und Konzepte für energieeffiziente bis hin zu CO₂-neutralen Quartieren und Kommunen erarbeitet. Die Evaluierung von innovativen Konzepten, Technologien und Systemen umfasst Labor- und Freilanduntersuchungen sowie die Begleitung von In-situ Demonstrationen und Pilotanwendungen. Darüber hinaus werden Technologien, Bewertungs- und Berechnungswerkzeuge zur energetischen Gebäudeplanung entwickelt.

Das **Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI** forscht für das Innovationssystem und versteht sich als unabhängiger Vordenker für Gesellschaft, Politik und Wirtschaft. Die Kompetenz im Bereich der Innovationsforschung stützt sich auf die Synergie aus technischem, wirtschafts- und sozialwissenschaftlichem Wissen. Im Fokus stehen die wissenschaftlichen, wirtschaftlichen, ökologischen, sozialen, organisatorischen, rechtlichen und politischen Entstehungsbedingungen für Innovationen und deren Auswirkungen. Die Abteilungen „Energiepolitik und Energiemärkte“ sowie „Energietechnologien und Energiesysteme“ bewerten den Beitrag der Energieeffizienz und erneuerbarer Energien zu Klimaschutz, Versorgungssicherheit sowie Wettbewerbsfähigkeit, erstellen Szenarien für die künftige Entwicklung und untersuchen die Ausgestaltung und Wirkung energiepolitischer Instrumente. Die Abteilung "Foresight" entwickelt und begleitet partizipative, zukunftsbezogene Strategieprozesse in Wirtschaft, Politik und Gesellschaft. Das Team unterstützt mithilfe partizipativer und diskursiver Formate die Auseinandersetzung mit alternativen Entwicklungen, gibt Impulse für die Überprüfung von Denkstrukturen und Wahrnehmungsfiltren und eröffnet so neue Gestaltungsmöglichkeiten.

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Der Arbeitsplan zur Erreichung der genannten Ziele beinhaltet fünf Arbeitspakete (AP), die mit ihren Interdependenzen in Abbildung 3 visualisiert sind. Übergeordnete Arbeiten der AP waren Wissensvermittlung und -generierung mit und aus den Forschungsprojekten des Gebäudebereichs der Forschungsinitiative Energiewendebauen. Aufbauend auf diesen Erkenntnissen wurden Pfadentwicklungen modelliert sowie Handlungs- und regulatorische Empfehlungen für einen klimaneutralen Gebäudebestand entwickelt. Mit der Durchführung von wissenschaftlichen Veranstaltungen, Befragungen und Veröffentlichungen sowie der Teilnahme an externen Veranstaltungen wurde in AP 1 der Wissenstransfer gefördert. In AP 2 wurden die Akzeptanz, Partizipation und Nutzer:Innen-Interaktion untersucht. AP 3 beinhaltete die Querauswertung und Zusammenstellung der Projektergebnisse der Gebäudeprojekte.

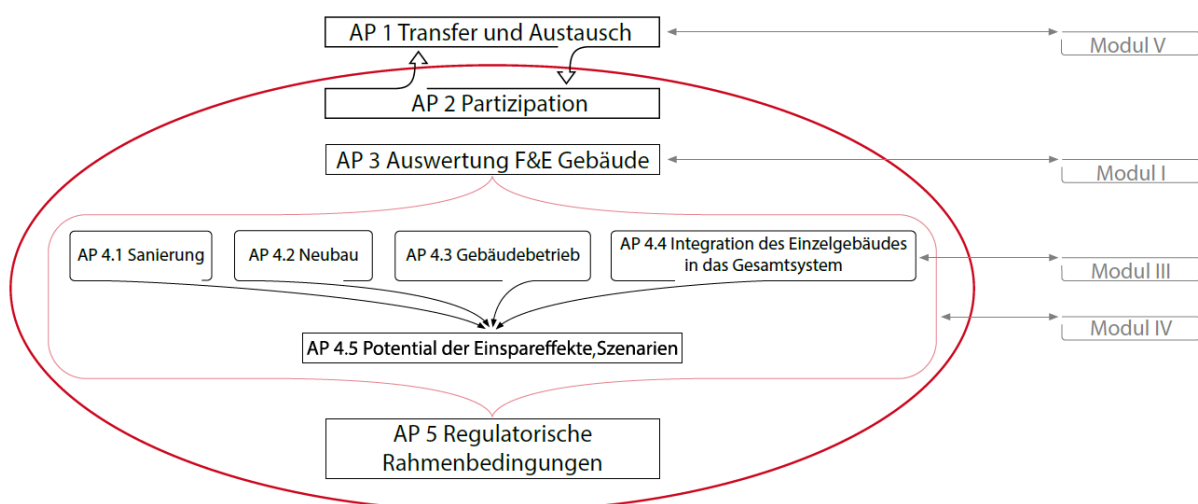


Abbildung 2: Arbeitspakete mit Interdependenzen

Darauf aufbauend wurden in AP 4 mit der energetischen Gebäudesanierung, dem Neubau als Innovationstreiber, dem smarten Gebäudebetrieb und der Integration des Einzelgebäudes in das Gesamtsys-

tem die zentralen Themen für einen klimaneutralen Gebäudebestand 2050 adressiert. Mittels querauswertender Analysen, Optimierungs- und Simulationsmethoden sowie der Grundlagenerarbeitung für die Ermittlung von Einsparpotenzialen an Energie und klimaschädlichen Emissionen in den Gebäudeprojekten sowie Szenarienanalysen auf Detailebenen vom Bauteil bis hin zum deutschen Gebäudebestand wurden die Integration erneuerbarer Energien und die Reduktion von Treibhausgasemissionen von Gebäuden untersucht. Schließlich untersuchte das AP 5 den übergeordneten Einfluss regulatorischer Rahmenbedingungen.

1.4 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Die Projektarbeit war intensiv von der Zusammenarbeit mit den anderen Modulen der Begleitforschung sowie vom Austausch mit EWB-Projekten geprägt. Zum Austausch mit EWB-Projekten dienten insbesondere die halbjährlich durchgeführten Projektetreffen, die Projektbefragungen, Projektinterviews sowie Fokustreffen zu ausgewählten Spezialthemen. Die Auswertung der Forschungsaktivitäten der EWB-Projekte ist als Kern der Projektarbeit dezidiert in Kapitel 3 an verschiedenen Stellen detailliert aufgeführt.

Neben der obligatorischen Abstimmung mit dem Leitungskreis (Projektleiter:Innen der Module, Vertreter:Innen von PtJ und BMWK) wurden in enger Zusammenarbeit mit den anderen Modulen zu unterschiedlichen thematischen Schwerpunktthemen Veranstaltungen, Workshops, Webinare und Fragebögen realisiert:

- Modul I: Querauswertungen, Metaanalysen, Datenakquise, Veranstaltungsberichte, etc. für die Projektlandkarte und Lastprofildatenbank als Bestandteil der Monitoringdatenbank
- Modul III: Ermittlung der Flexibilitätsmöglichkeiten in einer urbanen Struktur und die Schnittstellen mit dem Einzelgebäude sowie deren Einflüsse auf die Integration des Einzelgebäudes in das Gesamtsystem
- Modul IV: Potenziale eines smarten Gebäudebetriebs, Bewertung von digitalen Aufwänden als Bestandteil der Ermittlung der Einsparpotenziale der Forschungsprojekte
- Modul V: Veranstaltungen, Veröffentlichungen

Im Rahmen der Bewertung von Demonstrationsgebäuden aus dem Förderbereich EWB hinsichtlich Smart Readiness wurde ein von einem Konsortium im Auftrag der EU-Kommission noch in Entwicklung befindliches Tool (Kalkulationstabelle) [2] verwendet. Die Verwendung dieses Tools war mit der Erfüllung von Verpflichtungen zur Zusammenarbeit verbunden: Senden eines ausführlichen technischen Feedbacks an das Smart Readiness Indicator (SRI) Support Team und Teilnahme an einer zu diesem Zweck eingerichteten Online-Umfrage. Modulübergreifend wurde die durch Modul IV entwickelte Wissensplattform zur Sammlung, Visualisierung und Kommunikation genutzter Tools genutzt. Eine abschließende Dokumentation seitens Modul I/V gibt Übersicht über alle entwickelten Tools.

2 Eingehende Darstellung

2.1 Verwendung der Zuwendung und Vergleich der erreichten und vorgegebenen Ziele

Die Begleitforschung hat das BMWK und PtJ inhaltlich und methodisch bei der Umsetzung der energiepolitischen Ziele der Bundesregierung in neue Forschungsprogramme unterstützt. Die dazu abgerufenen Zuwendungen wurden zum wesentlichen Teil für Personalausgaben verwendet. Diese Ausgaben spiegeln sich in den erzielten Ergebnissen der Arbeitspakete wider. Die entstandenen Reisekosten resultieren aus den notwendigen Projekttreffen zwischen den Verbundprojektpartner:Innen sowie aus der Durchführung (und eigenen Teilnahme) der unterschiedlichen Veranstaltungsformate (Projekttreffen, Kongress, Fokustreffen), welche als Plattformen für die Präsentation von Forschungsergebnissen genutzt wurden. Ergänzt wurden die eigenen Formate durch die Teilnahme an externen Veranstaltungen zur Präsentation der wissenschaftlichen Ergebnisse. Da während der COVID19-Pandemie Reisen nur eingeschränkt möglich waren, wurde vermehrt auf digitale Formate zurückgegriffen und Mittel konnten anstelle von Reisen für zusätzliches Personal genutzt werden. Sachkosten fielen nur in geringem Maße für den Erwerb von Fachliteratur und Hardware zur Nutzung auf Messeformaten an.

Im Folgenden wird jeweils ein Kurzüberblick sowie ein Vergleich der angestrebten und erreichten Ziele der Arbeitspakete gegeben. Eine detailliertere inhaltliche Darstellung der Ergebnisse der einzelnen Arbeitspakete findet sich in Kapitel 3.

Arbeitspaket 1

Im Rahmen von AP 1 wurde der zielgruppenspezifische Transfer wissenschaftlicher Ergebnisse erfolgreich umgesetzt. Dies umfasste die Entwicklung und Etablierung geeigneter Formate zur Verbreitung wie Fachveröffentlichungen und Konferenzbeiträge, sowie die Nutzung der EWB-Website bzw. die der Forschungsnetzwerke Energiewendebauen als zentrale Plattformen. Austauschformate wie Workshops, Fokustreffen und Netzwerktreffen förderten den Dialog zwischen Forschung, Praxis und Politik. Besonderes Augenmerk lag auf der Breitenwirksamkeit, die durch zielgerichtete Veröffentlichungen und Veranstaltungen, darunter die EWB-Kongresse, erreicht wurde. Durch enge Abstimmung mit Modul V und die intensive Zusammenarbeit mit dem PtJ und BMWK konnten praxisnahe Inhalte integriert und eine starke Vernetzung zwischen den Akteur:Innen der Energiewende sichergestellt werden.

Arbeitspaket 2

In AP 2 wurden verschiedene Akteur:Innen-Gruppen und -Gruppenspezifische Erfolgsfaktoren und Hemmnisse bei der Umsetzung von Forschungsprojekten identifiziert. Die Akteur:Innen-Gruppen konnten mittels der Akteur:Innen-Landkarte kategorisiert werden. Hemmnisse und Erfolgsfaktoren wurden z. B. durch Befragungen von den Projektnehmer:Innen gesammelt. Das ursprüngliche Ziel, Einflussfaktoren auf das Nutzer:Innen-Verhalten für Modellierungen aufzubereiten, wurde verworfen. Anstelle dessen wurde eine Übersicht über Methoden und Fragestellungen in den aktuellen Forschungsprojekten, bezogen auf das Nutzer:Innen-Verhalten, gegeben.

Arbeitspaket 3

Das AP 3 diente der zentralen Auswertungen der Forschungs- und Entwicklungsergebnisse der Vorhaben im Gebäudebereich der EWB-Forschungsinitiative. Neben eigenen Deliverables bildete es auch die Grundlage für die Ergebnisse aus anderen Arbeitspaketen. Ein zentrales Element war die Clusterung der im Bereich Energiewendebauen geförderten und dem Modul II zugeordneten Forschungsprojekte in einer Datenbank. Die Projektclusterung erfolgte auf Basis von Informationen aus der EnArgus Projektdatenbank sowie der jeweilig verfügbaren Projektwebseiten und -veröffentlichungen und wurde durch die Ergebnisse von zwei durchgeführten Projektbefragungen validiert und verdichtet. Das Pro-

jektcluster wurde in regelmäßigen Abständen aktualisiert. Mit dem Projektcluster konnten unter anderem Projekte mit bestimmten Themenschwerpunkten identifiziert und gezielt angesprochen oder in die Querauswertungen mit einbezogen werden.

Für Begrifflichkeiten aus dem Bereich „energieeffiziente Gebäude“ wurde ein Glossar mit insgesamt 338 Begrifflichkeiten zusammengestellt, veröffentlicht und die Inhalte für das Glossar der Forschungsnetzwerke (www.forschungsnetzwerke-energie.de) zur Verfügung gestellt. Aus Fragebögen und der Auswertung von Forschungsberichten wurde eine Liste der in den Forschungsprojekten verwendeten wichtigen Indikatoren im Bereich Flächen, Qualitäten, Verbräuche, Emissionen und Kosten erarbeitet, die jeweiligen Indikatoren erläutert und die verfügbaren Kennwerte (Benchmarks) zusammengetragen. Des Weiteren erfolgte eine detaillierte Auswertung der Erkenntnisse und Lernerfahrungen (Lessons Learned) aus den Forschungsprojekten. Die Grundlage für die Auswertung stellte die Erfassung von Lernerfahrungen im Rahmen von zwei durchgeführten Befragungen dar.

Ursprünglich sah AP 3 auch die Ermittlung der Grundlagen für die Zusammenstellung der Einsparfekte an Energie und klimaschädlichen Emissionen vor. Dazu wurden in einem Fragebogen Kenndaten und Hintergrundinformationen von den Projektnehmer:Innen abgefragt und versucht, entsprechende Informationen aus Projektabschlussberichten zu entnehmen. Leider waren diese Informationen nur begrenzt und in der Herleitung stark voneinander abweichend verfügbar. Deshalb wurde anstatt der vorgesehenen Querauswertung von vorhandenen Einsparkenndaten (allgemein im AP 3 und aufgeteilt in Sanierung und Neubau in AP 4.1 und AP 4.2) in Abstimmung mit dem PtJ eine projekttypabhängige Methode entwickelt, mit der die Projektnehmer:Innen das Einsparpotenzial ihres Forschungsvorhabens bestimmen können. Dazu wurden insgesamt sechs projekttypabhängige Leitfäden und ein Bericht mit den Hintergründen zur Entwicklung der Methode erarbeitet und die Methode an Beispielprojekten getestet.

Arbeitspaket 4

Arbeitspaket 4.1

AP 4.1 beleuchtete die energetische Gebäudesanierung als Kernbaustein der Energiewende. Durch Literaturrecherche und Projektbefragungen konnten Haupteinflussfaktoren auf die energetische Gebäudesanierung sowie zum Nutzer:Innen-Verhalten gesammelt und bewertet werden. Der Aufbau von Optimierungsmodellen für Modernisierungsfahrpläne von Gebäuden ermöglichte die Ermittlung robuster, optimierter Sanierungs- und Modernisierungsmaßnahmen. Zur Quantifizierung des Potenzials der Einsparfekte an Energie und klimaschädlicher Emissionen bei der Umsetzung der Forschungsvorhaben wurden in Zusammenarbeit mit anderen APs Leitfäden erstellt, anhand derer Forschungsprojekte eine Quantifizierung selbst durchführen können.

Arbeitspaket 4.2

In AP 4.2 wurden die innovativen Technologien im Gebäudebereich der EWB-Forschungsinitiative identifiziert und querausgewertet. Dabei wurden Themen wie z. B. das Technology Readiness Level, die Ziele der Innovation sowie die Einsatz- und Anwendungsbereiche beleuchtet. Da sich bei dieser Auswertung zeigte, dass die Mehrzahl der erforschten Technologien nicht auf eine bestimmte Art der Baumaßnahme (Neubau oder Sanierung) zugeschnitten ist, wurde auch die zweite Querauswertung dieses Arbeitspakets auf den gesamten Gebäudebereich (statt nur auf den Neubaubereich) ausgeweitet. In der zweiten Querauswertung wurden die kostengünstigen Lösungen der Förderinitiative gebündelt sowie Informationen zu Kosten im Gebäudebereich aus der Literatur festgehalten. Die Veröffentlichungen der beiden Themen enthalten Listen der jeweils ausgewerteten Forschungsprojekte. Die Einsparung an Energie und klimaschädlichen Emissionen soll von den Projektnehmer:Innen mithilfe von Leitfäden, die im Arbeitspaket 3 erarbeitet wurden, ermittelt werden.

Arbeitspaket 4.3

Ziel des Arbeitspakets 4.3 war die Analyse und Bewertung der EWB-Forschungsvorhaben mit der Prämisse, wie in den Vorhaben eine Betriebsoptimierung erfolgt und welche Regelungsmethoden (beispielsweise smarte Regelungstechnologien) hierfür genutzt wurden. In der Analyse sollten Einsparpotenziale durch den Einsatz dieser Methoden/Technologien qualitativ bewertet werden. Darüber hinaus sollte die Robustheit der eingesetzten Technologien innerhalb der Vorhaben analysiert und dargestellt werden. Die Fähigkeit von Demonstrationsgebäuden mit Nutzenden und Netzen zu interagieren, sollte durch den Anwendungstest der EU-Methode „Smart Readiness Indicator“ (SRI) geprüft und bewertet werden. Unter anderem für die Entwicklung und Überprüfung von Regelungstechnologien sollten zur Unterstützung der Forschungscommunity Lastprofile aus den Demonstrationsvorhaben zusammengetragen und in einer Datenbank abgelegt werden.

Innerhalb des Arbeitspakets wurden Querauswertungen der Vorhaben zu Methoden der Betriebsoptimierung und des Einsatzes smarterer Regelungstechnologien durchgeführt und deren Ergebnisse kategorisiert zusammengestellt und innerhalb einer Publikation veröffentlicht. Mit Hilfe eines mit BF-Modul IV gemeinsam entwickelten Expert:Innen-Fragebogens wurden zusätzlich energetische Potenziale abgefragt. Es hat sich gezeigt, dass energetische Potenziale durch den Einsatz digitaler Lösungen überwiegend nicht bekannt sind; zukünftig sollen diese Potenziale von Forschungsnehmer:Innen über einen erarbeiteten Leitfaden zur Ermittlung von Einspareffekten adressiert werden. In Zusammenarbeit mit BF-Modul I und BF-Modul IV wurde ein Verfahren erarbeitet, welches die Abfrage von Lastprofilen ermöglicht. Aus Gründen der Datenkonsistenz und Datenintegrität wurde entschieden, die Lastprofile nicht in einer eigenen Datenbank abzulegen, sondern hierfür die von BF-Modul I/V der Begleitforschung entwickelte Monitoringdatenbank zu nutzen. Eine systematische Analyse von Unsicherheitsfaktoren sowie eine Untersuchung geeigneter Technologien zur Entwicklung robuster Gebäudebetriebsweisen wurden durchgeführt. Eine Querauswertung identifizierte zentrale Herausforderungen und bewährte Methoden zur Steigerung der Robustheit im Gebäudebetrieb. Einhergehend mit der geplanten Einführung des „Smart Readiness Indicator“ aus der europäischen Gebäudeenergieeffizienzrichtlinie (EPBD) wurden mehrere Demonstrationsgebäude aus Forschungsprojekten hinsichtlich ihrer Smart Readiness bewertet. Dabei wurde die EU-Methode des Smart Readiness Indicators getestet und die Ergebnisse und die dabei gemachten Erfahrungen in einem Deliverable dokumentiert und veröffentlicht.

Arbeitspaket 4.4

Im Rahmen dieses Arbeitspakets wurde die Thematik der Netzdienlichkeit umfassend untersucht. Eine Definitionsmatrix zur Bestimmung der Netzdienlichkeit wurde entwickelt, Flexibilitäts- und Speicheroptionen im Gebäudebereich sowie mögliche netzdienliche Gebäudekonzepte analysiert. Ein Optimierungsmodell wurde erstellt, das die Gebäudemasse mittels physikalischer Modelle als Speicheroption integriert und eine multiperspektivische Bewertung netzdienlicher Gebäudekonzepte ermöglicht. Auf Basis des Modells wurden energetisch, ökologisch und ökonomisch optimierte Energiesysteme für typische Wohn- und Nichtwohngebäude identifiziert. Zudem wurden typische netzdienliche Gebäudekonzepte aus den Forschungsprojekten mithilfe des Optimierungsmodells abgebildet und aus verschiedenen Perspektiven analysiert.

Arbeitspaket 4.5

AP 4.5 befasste sich mit der Erstellung von Modernisierungsfahrplänen und der Szenarienbetrachtung des Energiebedarfs des deutschen Gebäudebestandes. Durch eine Skalierung der optimierten Modernisierungsfahrpläne aus AP 4.1 konnten Einsparpotenziale auf Ebene des deutschen Gebäudebestands erhoben werden. Ergänzend dazu geben die Ergebnisse eines agentenbasierten Modells Aufschlüsse darüber, wie sich der Energiebedarf des deutschen Gebäudebestands in verschiedenen Szenarien entwickelt.

Arbeitspaket 5

AP 5 fokussierte die Betrachtung des Einflusses regulatorischer Rahmenbedingungen auf die Gebäudeenergieeffizienz. Durch Literaturrecherche sowie Projektbefragungen wurden regulatorische Rahmenbedingungen mit Relevanz für den Forschungsbereich EWB Modul II Gebäude zusammengetragen und bewertet. Anhand modellbasierter Betrachtungen wurde der Einfluss der Auswirkungen regulatorischer Rahmenbedingungen auf die Technologiewahl weiterhin quantitativ betrachtet.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die seitens der Wissenschaftlichen Begleitforschung gesteckten Ziele mit Blick auf die jeweiligen Arbeitspakete erreicht werden konnten. In einzelnen Arbeitspaketen wurden in Abstimmung mit dem Projektträger die Arbeitsinhalte leicht angepasst.

2.2 Notwendigkeit und Angemessenheit der Arbeit

Die durchgeführten Forschungsarbeiten im Verbundvorhaben BF2020 Begleitforschung Energiewendebauen - Modul Gebäude - sowie die dafür aufgebrauchten Ressourcen waren notwendig und angemessen, da sie der im Projektantrag formulierten Planung entsprachen und alle wesentlichen im Arbeitsplan formulierten Aufgaben erfolgreich bearbeitet wurden. Darüber hinaus waren keine zusätzlichen Ressourcen für das Projekt notwendig.

2.3 Verwertbarkeit der Ergebnisse im Sinne des fortgeschrittenen Verwertungsplans

Ziel der Begleitforschung war die Aufbereitung und Verbreitung von wissenschaftlichen Erkenntnissen und praktischen Erfahrungen aus den Forschungsprojekten zur Entwicklung und Umsetzung von energieeffizienten Gebäuden. Der Forschungsbeitrag des Moduls Gebäude der Begleitforschung Energiewendebauen lag dabei insbesondere in der vergleichenden Auswertung laufender Projekte, der Unterstützung der Forschungslandschaft durch zusammenfassende Analysen und Leitfäden, der Durchführung eigener, forschungsbegleitender Modellrechnungen sowie der zielgruppenspezifischen Aufbereitung und Kommunikation der zusammengetragenen Ergebnisse. Die Ergebnisse der Querschnittsforschung liefern dabei breite Informationen über Lösungsansätze zur Verbesserung und Umsetzung der Energieeffizienz von Gebäuden.

Werkzeuge zur Unterstützung der Forschung

Im Rahmen der Projektlaufzeit wurden verschiedene Werkzeuge zur Unterstützung der Forschungslandschaft entwickelt und der Forschungscommunity bereitgestellt. Darunter fallen sowohl die Erarbeitung von Leitfäden, die übersichtliche Darstellung von Indikatoren zum einheitlichen Benchmarking, die Bereitstellung von für weitere Forscher:Innen nutzbare Daten sowie die Dokumentation und Vereinheitlichung von Begrifflichkeiten energieeffizienter Gebäude.

Da die Datenlage auf Basis der Projektabschlussberichte und der ausgesendeten Fragebögen aufgrund mehrheitlich fehlender oder nicht vergleichbarer Daten keinen Quervergleich der Einsparpotenziale zuließ, wurden in Abstimmung mit dem PtJ Leitfäden für die Ermittlung von Einspareffekten an Energie und klimaschädlichen Emissionen bei der Umsetzung der Forschungsvorhaben und deren Skalierung erarbeitet und auf insgesamt sechs unterschiedliche Projekttypen angepasst. Diese Arbeiten wurden durch Workshops und Interviews mit Projektnehmenden unterstützt und begleitet. Die Leitfäden sollen in Zukunft die Projektnehmer:Innen bei den Projektskizzen und der Dokumentation der Einsparpotenziale im Abschlussbericht anleiten und eine Querauswertung von dann vergleichbaren Kennzahlen ermöglichen.

Um eine erste Übersicht über die im Bereich energieeffizienter Gebäude verwendeten Indikatoren zu schaffen, wurden diese durch schriftliche Befragungen und die Analyse vorhandener Abschlussberichte identifiziert. Die Ergebnisse wurden in Form von Indikatorlisten und Indikatoren-Steckbriefen aufbereitet [3]. Die identifizierten Indikatoren zeigen, welche Indikatorkennwerte in früheren Forschungsprojekten bereits behandelt oder ermittelt wurden. Durch die Angabe der Quelle in den jeweiligen Steckbriefen können die entsprechenden Forschungsprojekte leicht gefunden und Kontakte hergestellt werden.

In enger Zusammenarbeit mit Modul I und Modul IV wurde ein Verfahren entwickelt, mit dessen Hilfe Lastprofile aus der Monitoringdatenbank von Forscher:Innen identifiziert und abgefragt werden können. Die Beschreibung der Vorgehensweise wurde in den Monitoringleitfaden der Begleitforschung [4] integriert.

Um den Zeitaufwand für Modernisierungsmaßnahmen besser zu quantifizieren und damit Einflüsse der Handwerkskapazität auf die Gebäudeenergiegewende zu ermitteln, wurden Expert:Innen-Interviews mit 90 Handwerksunternehmen durchgeführt und die Ergebnisse in Optimierungsmodelle integriert. Diese Daten ermöglichen präzisere Analysen der begrenzten Kapazitäten und stehen der Forschung durch Veröffentlichungen, unter anderem in *Nature Scientific Data* [5], zur Verfügung.

Um die Begrifflichkeiten selbst, aber auch deren Verwendung in einem Kontext, zu vereinheitlichen, wurde ein Glossar für Begriffe aus dem Bereich „energieeffiziente Gebäude“ zusammengestellt. Das Glossar zeigt außerdem auf, welche Begrifflichkeiten im direkten Zusammenhang miteinander stehen und ermöglicht so den Leser:Innen, sich über zusammenhängende Begriffe zu informieren sowie Gemeinsamkeiten bzw. Unterschiede bei ähnlichen Begriffen zu identifizieren.

Die erstellte Definitionsmatrix zur Netzdienlichkeit, die im Rahmen eines Berichts [6] auf der EWB-Website veröffentlicht wurde, bietet in tabellarischer Form einen Überblick über mögliche Eigenschaften, Mehrwerte und Ziele netzdienlicher Gebäude. Diese sind zwei Kategorien zugeordnet: der Betriebsweise sowie den Auswirkungen des Gebäudekonzepts auf das Stromnetz.

Querauswertungen der Forschungslandschaft

Mit dem Ziel der Schaffung einer Übersicht über die Forschungslandschaft sowie der Identifikation und Zusammenfassung weiteren Forschungsbedarfs entstanden durch Modul II der Wissenschaftlichen Begleitforschung verschiedene Querauswertungen:

Im Bereich der sozioökonomischen Faktoren wurde eine Querauswertung zum Einfluss des Nutzer:Innen-Verhaltens erstellt und der Forschungscommunity bereitgestellt. Ergänzend dazu fanden im Rahmen der Fragebögen Expert:Innen-Befragungen zur Bewertung des Einflusses sozioökonomischer Faktoren auf die Sanierungsentscheidung statt.

Mit der Querauswertung zu den innovativen Gebäudetechnologien [7] wurden die Arbeiten der EWB-Forschungsprojekte in diesem Bereich gebündelt. Die gesammelten Informationen und projektübergreifenden Auswertungen sollen sowohl Forscher:Innen als auch Planer:Innen und Hersteller:Innen einen Überblick über den aktuellen Stand der Forschung geben, um so die weitere Anwendung, Verbreitung und Weiterentwicklung der Technologien zu unterstützen.

Projekte, die sich mit kostengünstigen und kostensparenden Lösungen im Gebäudebereich befassen, wurden ebenfalls identifiziert und querausgewertet. Die Veröffentlichung [8] fasst im ersten Teil das umfassende Thema der Kosten im Gebäudebereich zusammen. Im zweiten Teil werden die kosteneffizienten Lösungsansätze in der EWB-Forschungsinitiative nach Themenfeldern und Lebenszyklusphasen geclustert. Mithilfe dieser Querauswertung sollen der aktuelle Forschungsstand dargestellt und Forschungslücken zum Thema kosteneffiziente Lösungen im Gebäudebereich identifiziert werden.

Der Einsatz von smarten Technologien wurde für die dem Modul II und Modul IV zugeordneten EWB-Forschungsprojekte bezüglich der Aspekte Methode, Einsatzgebiete und Optimierungsziele querausgewertet, die Ergebnisse wurden hierbei mittels einer Publikation [9] der Öffentlichkeit bereitgestellt.

Die Smart-Readiness-Bewertung an insgesamt sieben Demonstrationsgebäuden aus der Forschungsinitiative Energiewendebauen zeigt, dass es nicht ausreicht, smarte Anwendungen nur in einzelnen technischen Bereichen umzusetzen. In der zugehörigen Veröffentlichung [10] werden die EU-SRI-Bewertungsmethode detailliert erläutert sowie die Regelungs- und Steuerungsdetails zusammengestellt, die es ermöglichen eine hohe SRI-Punktzahl zu erreichen. Damit können die Bearbeiter:Innen von zukünftigen Projekten die Intelligenzfähigkeit der enthaltenen Gebäude analysieren und die noch ausbaufähigen technischen Bereiche identifizieren.

Im Bereich der regulatorischen Rahmenbedingungen erfolgte eine Analyse und Bewertung aktueller Rahmenbedingungen [11], welche ergänzt um die Einschätzung aus einer Projektbefragung zusammengetragen und der Forschungscommunity bereitgestellt wurden.

Zur Untersuchung verschiedener Flexibilitäts- und Speicheroptionen in den Projekten wurde eine Querauswertung [6] publiziert, die relevante technische Bausteine für die Gestaltung netzdienlicher Gebäudeenergiesysteme identifiziert. Weiterhin wurde eine umfangreiche Analyse der Betriebsstrategien, Gebäudeenergiesysteme und der untersuchten Auswirkungen auf das Stromnetz von Projekten im Bereich Netzdienlichkeit durchgeführt und veröffentlicht, um typische netzdienliche Lösungen zu identifizieren und möglichen Forschungsbedarf in diesem Bereich abzuleiten.

Um einen Überblick über aktuelle Forschungsthemen und -lücken in den Bereichen Lüftungsforschung und Wärmepumpenforschung zu geben, wurden jeweils Querauswertungen der dem Modul II zugeordneten Projekte durchgeführt. Entsprechend konnten in beiden Bereichen Schwerpunkte identifiziert und offene Fragestellungen formuliert werden.

Die in einer Querauswertung gesammelten und aufbereiteten Lessons Learned aus den Projekten ermöglichen den zukünftigen Projekten, aus den bereits gewonnenen Erfahrungen und Erkenntnissen zu lernen und ihre Projekte effizienter zu gestalten sowie ähnlichen Hemmnissen entgegenzuwirken und die Erfolgsquote in der Planung und Umsetzung zu steigern. Zusätzlich kann Handlungs- und Forschungsbedarf abgeleitet werden und eine Grundlage für weiterführende Analysen oder Entscheidungsprozesse geschaffen werden.

Modellbasierte Analysen

Zur vertiefenden Auswertung des Forschungsbereichs erfolgten in der Projektlaufzeit verschiedene modellbasierte Analysen. Durch die Analysen konnten u. a. sinnvolle Sanierungs- und Modernisierungsmaßnahmen für Typgebäude analysiert werden. Durch die Ergebnisaufbereitung für die Praxis in Form von Veröffentlichungen in praxisnahen Magazinen (Gebäude-Energieberater [11], [12] und Moderne Gebäudetechnik [13]) konnte Planer:Innen eine Hilfestellung in frühen Entscheidungsphasen der energetischen Sanierung eines Gebäudes zur Verfügung gestellt werden. Die Aufbereitung in diversen wissenschaftlichen Veröffentlichungen ermöglicht die Weiternutzung der Ansätze durch Forscher:Innen.

Die Optimierungsmodelle konnten weiterhin zur Analyse des Einflusses regulatorischer Rahmenbedingungen genutzt werden. Darunter fallen u. a. Auswertungen zum Einfluss von Förderungen [14], des Mieter:Innen-Vermieter:Innen-Dilemmas [15] und von Mindestanforderungen an die Energieeffizienz [14]. Die Ergebnisse wurden sowohl durch internationale Veröffentlichungen mit der Forschungslandschaft geteilt als auch in eigens etablierten Treffen mit dem BMWK diskutiert.

Zur Abbildung und quantitativen Bewertung unterschiedlicher netzdienlicher Gebäudekonzepte wurde ein vorhandenes Optimierungsmodell weiterentwickelt. Durch die Variation von Zielfunktionen,

Restriktionen und Randbedingungen des Modells konnten verschiedene netzdienliche Gebäudekonzepte simuliert und hinsichtlich Wirtschaftlichkeit, Umweltfreundlichkeit, Netzdienlichkeit und Nutzer:Innen-Zufriedenheit [16] bewertet werden. Auf dieser Grundlage wurden optimierte Energiesysteme für typische Wohn- und Nichtwohngebäude in Deutschland entwickelt [17], welche ökologische, ökonomische und netzdienliche Aspekte berücksichtigen. Zusätzlich wurden typische netzdienliche Gebäudekonzepte aus der Forschung mithilfe des Modells abgebildet und aus verschiedenen Perspektiven analysiert (vgl. Kapitel 3.4.4.4).

Zur Quantifizierung des Energiebedarfs im deutschen Gebäudebestand wurden zunächst drei Szenarien - basierend auf aktuellen gesellschaftlichen, ökonomischen, ökologischen und regulatorischen Rahmenbedingungen - entwickelt und in einem agentenbasierten Modell betrachtet. Die Methodik und die Ergebnisse der Szenarienentwicklung und Modellierung wurden durch Vorträge und wissenschaftliche Veröffentlichungen einem nationalen und internationalen Publikum zugänglich gemacht. Die Ergebnisse wurden in einem Webtool visualisiert. Der webvisualisierte und interaktive Szenariengenerator¹ ermöglicht einen schnellen Überblick über die Entwicklung des Energiebedarfs und der CO₂-Emissionen im deutschen Gebäudebestand bis zum Jahr 2050.

Wissenstransfer und Vernetzung

Das Ergebnis der Begleitforschung sind wissenschaftliche Erkenntnisse und praktische Erfahrungen aus den Demonstrationsprojekten zur Entwicklung und Umsetzung von energieeffizienten Gebäuden. Die Ergebnisse wurden im Rahmen der Öffentlichkeitsarbeit der allgemeinen Öffentlichkeit sowie der Fachöffentlichkeit zur Verfügung gestellt. Damit trug das Projekt dazu bei, dass Erkenntnisse zu technischen und planerischen Innovationen direkt in die Planungspraxis und in Umsetzungsprojekte einfließen.

Die Veranstaltungen der Begleitforschung – wie die Projekte- und Fokustreffen – dienten der Vernetzung der Projekte und konnten somit einen Beitrag zur Abstimmung zwischen den Projekten und zur Initiierung neuer Projektvorhaben und Konsortien beitragen. Veröffentlichungen auf nationalen und internationalen Tagungen, in Fachzeitschriften für unterschiedliche Zielgruppen (z. B. Forschung und Praxis) sowie Berichte und Artikel auf der EWB-Homepage dienten dem Wissenstransfer. Durch das entwickelte Konzept zur zielgruppengerechten Ansprache in Veröffentlichungen konnten die Forschungserkenntnisse gezielter verbreitet werden.

Sonstige Verwertung

Darüber hinaus wurden die Ergebnisse fortwährend in die Lehrveranstaltungen an der RWTH Aachen University und über das Fraunhofer IBP in Lehrveranstaltungen an der Universität Stuttgart eingebunden. Dazu ergänzend wurden die Projektergebnisse für die Entwicklung und die Durchführung von studentischen Abschlussarbeiten und Promotionen genutzt.

2.4 Fortschritte auf dem gleichen Gebiet durch andere Stellen

Die Arbeit von Modul II der Begleitforschung erfolgte in Zusammenarbeit mit den anderen BF-Modulen I und III-V der Begleitforschung, wie in Kapitel 1.4 vorgestellt wird. Verschiedene Entwicklungen der anderen Module waren daher für die Arbeit von BF-Modul II relevant. Darunter fällt die Entwicklung der Monitoringdatenbank durch BF-Modul I der Begleitforschung, in welche durch BF-Modul II Vorgaben für die Einspielung von Lastprofilen durch Forschungsprojekte beigetragen wurden. Ergänzend dazu wurde durch BF-Modul IV der Begleitforschung ein Lastprofilgenerator auf der durch BF-Modul IV entwickelten Wissensplattform bereitgestellt, um neben der Monitoringdaten auch synthetische

¹ <https://scenario-generator.eonerc.rwth-aachen.de/de/>

Lastprofile erstellen zu können. Weiterhin wurden Ergebnisse von BF-Modul IV im Bereich der Ermittlung der Aufwände digitaler Technologien genutzt, um diese in die Leitfäden zur Ermittlung von Einsparpotentialen der EWB-Gebäudeforschungsprojekte zu integrieren.

Auch die Durchführung von Projektetreffen und der EWB-Kongresse erfolgte in enger Zusammenarbeit mit den anderen Modulen. Hier konnte BF-Modul II von der durch BF-Modul I/V geschaffenen Veranstaltungsstruktur profitieren und inhaltlich zum Gelingen der Veranstaltungen beitragen.

Neben der Zusammenarbeit mit den anderen Modulen wurde im vorliegenden Projekt auf verschiedene Daten und Ansätze anderer Projekte zurückgegriffen, welche u. a. während der Projektlaufzeit erstellt oder aktualisiert wurden. Darunter fallen beispielsweise die Daten des Zensus 2022 [18], aber auch der Kostenkatalog zu Wärmeerzeuger- und Energiepreisen des Kompetenzzentrums kommunale Wärmeplanung [19]. Weiterhin entnehmen verschiedene in AP 4 und AP 5 entwickelte Modellierungsansätze Aspekte aus jüngst veröffentlichter Literatur. Sofern dies der Fall ist, wird das in den entsprechenden Kapiteln der Modellbeschreibungen gesondert referenziert.

Für die Querauswertung zu den kostensparenden Technologien wurden als Datengrundlage neben der veröffentlichten Literatur und Informationen aus den Forschungsprojekten der Forschungsinitiative EWB auch Ergebnisse des Förderprogramms Variowohnungen und Informationen zum Förderaufruf "Klimafreundlicher Neubau im Niedrigpreissegment" herangezogen, um den aktuellen Stand zum kostensparenden Bauen darzustellen. Bei der Querauswertung zum SRI wurde ein Bewertungsinstrument eines EU-Vorhabens, das so genannte SRI-Bewertungstool in Form einer Kalkulationstabelle [2], genutzt. Die mit der Anwendung des Tools gesammelten Erfahrungen und Erkenntnisse sowie Möglichkeiten zur Verbesserung wurden in einem detaillierten technischen Feedback dem EU-Vorhaben zur Verfügung gestellt. In einer dafür eingerichteten Online-Umfrage wurden zusätzlich zu den Erfahrungen auch die erzielten Ergebnisse von insgesamt acht Forschungsvorhaben zurückgespiegelt.

2.5 Veröffentlichungen

Dieses Kapitel stellt die Veröffentlichungen im Rahmen des Projektes dar. Es wird unterschieden zwischen eigenen Veröffentlichungen der Wissenschaftlichen Begleitforschung oder Beiträgen in Zeitschriften sowie auf Konferenzen. Studentische Arbeiten sind ebenfalls aufgeführt.

2.5.1 Veröffentlichungen der Wissenschaftlichen Begleitforschung

Eine chronologische Auflistung über die Veröffentlichungen in wissenschaftlichen Papieren findet sich in Tabelle 1. Thematische Querauswertungen und weitere Beiträge zur EWB-Forschung enthält Tabelle 2. Ergänzend zeigt Tabelle 3 die veröffentlichten Veranstaltungsberichte. Nicht aufgeführt sind die Beiträge von Modul II zu den Veranstaltungsberichten der gesamten Begleitforschung, deren Hauptautorschaft bei BF-Modul I/V der Begleitforschung liegt.

Tabelle 1: Veröffentlichungen in wissenschaftlichen Papieren

Institution	Autor:Innen	Thema/Titel	Art der Publikation	Publikationsjahr	DOI/ISBN
RWTH Aachen	J. Richarz, Y. Hu, M. Wirtz, T. Osterhage, D. Müller	Robust optimal identification and scheduling of modernization measures for typical buildings	Konferenzpapier	2021	978-1-7750520-2-9
RWTH Aachen, TU Berlin	L. Maier, M. Mans, F. Wüllhorst, Y. Nie, R. Streblov.	Gasverbrauch senken, Heizkosten sparen: Bewertung von einfachen Energieeffizienzmaßnahmen	Whitepaper	2022	10.18154/RWTH-2022-07544
RWTH Aachen	J. Richarz, S. Henn, T. Osterhage, D. Müller	Optimal scheduling of modernization measures for typical non-residential buildings	Journal paper	2022	10.1016/j.energy.2021.121871

RWTH Aachen	J. Richarz, D. Hering, D. Müller	Potentiale vorausdenken – Langfristige strategische Modernisierungsplanung (Teil 1 + 2)	Zeitschriftenaufsatz, Beitrag im Magazin ‚Gebäude-Energieberater‘	2022	
RWTH Aachen	Y. Zhang, T. Wiederhöft, T. Schreiber, D. Müller	OPTIMIZATION OF A GRID-INTERACTIVE BUILDING ENERGY SYSTEM CONSIDERING USER SATISFACTION	Konferenzpapier	2022	978-3-00-073975-0
RWTH Aachen	J. Richarz, D. Hering, D. Müller	Robust optimal multi-year modernization roadmaps for typical existing buildings	Konferenzpapier	2022	doi.org/10.11581/dtu.00000267
Fraunhofer ISI	I. Brunzema, E. Dütschke	Who builds the energy transition? Actors and networks in a German research initiative	Konferenzpapier	2022	10.24406/publica-410
RWTH Aachen	J. Richarz, S. Wegewitz, S. Henn, D. Müller	Graph-based research field analysis by the use of natural language processing: An overview of German energy research	Journal paper	2023	10.1016/j.techfore.2022.122139
RWTH Aachen	J. Richarz, N. Fuchs, D. Hering, D. Müller	Modernization Roadmaps for Existing Buildings under Limited Energy Resources and Craftwork Capacities	Journal paper	2023	10.3390/en1010000
RWTH Aachen	J. Richarz, N. Fuchs, J. Zurke, J. Imberg, T. Datsko, D. Hering, D. Müller	Realization times of energetic modernization measures for buildings based on interviews with craftworkers	Journal paper	2023	10.1038/s41597-023-02379-6
RWTH Aachen	N. Fuchs, D. Hering, D. Müller	Politische Maßnahmen und ihr Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit von Gebäudeenergiesystemen	Zeitschriftenaufsatz, Beitrag im Magazin ‚Moderne Gebäudetechnik‘	2023	
RWTH Aachen	N. Fuchs, J. Baumgärtner, L. Maier, D. Müller	Development of an optimization-based methodology for subsidy programs in residential buildings	Konferenzpapier	2023	978-1-7138749-28
RWTH Aachen	N. Fuchs, J. Baumgärtner, L. Maier, D. Müller	Development of an optimization-based methodology for subsidy programs of residential buildings	Journal paper	2024	10.1016/j.applthermaleng.2024.124880
Fraunhofer IBP, RWTH Aachen	J. Kaiser, H. Erhorn-Kluttig, Y. Zhang, L. Maier und D. Müller	Was heißt smart im Gebäude?	Zeitschriftenaufsatz, Beitrag im Magazin ‚Gebäude-Energieberater‘	2024	
Fraunhofer ISI	M. Bagheri, E. Dönitz, S. Yu, H. Brügger	Exploration of qualitative scenarios towards climate neutrality of the German building sector	Konferenzpapier	2024	10.24406/publica-3335
Fraunhofer ISI	Ş. Alibaş, S. Yu	Developing a regionalized representative building stock model for Germany	Konferenzpapier	2024	10.24406/publica-3336
Fraunhofer ISI	Ş. Alibaş, M. Bagheri, S. Yu	Analyse der Einsparpotenziale an Energie und CO ₂ -Emissionen im deutschen Gebäudebestand unter verschiedenen Szenarien	Whitepaper	2024	10.24406/publica-4021
RWTH Aachen	L. Kühn, N. Fuchs, L. Braun, L. Maier, D. Müller	Landlord-Tenant Dilemma: How Does the Conflict Affect the Design of Building Energy Systems?	Journal paper	2024	10.3390/en17030686
Fraunhofer ISI	Ş. Alibaş, S. Yu, M. Bagheri	Modeling Transformation Scenarios of the Building Stock in Germany: An Agent-Based Approach	Journal paper	Geplant 2025	

Tabelle 2: Thematische Querauswertungen und Beiträge zur EWB-Forschung

Institution	Autor:Innen	Thema/Titel	Art der Publikation	Publikationsjahr
Fraunhofer IBP	L. Lyslow, H. Erhorn-Kluttig, J. Preuss, M. Illner, H. Brugger, E. Dütschke, A. Gundlach, Y. Zhang, N. Fuchs	Glossar für Begrifflichkeiten aus dem Bereich der energieeffizienten Gebäude	Glossar	2022
Fraunhofer IBP	L. Lyslow, H. Erhorn-Kluttig	Analyse und Bewertung von Demonstrationsgebäuden hinsichtlich Smart Readiness anhand der Anwendung der EU-Bewertungsmethode des Smart Readiness Indicators (SRI)	Bericht	2022
Fraunhofer IBP	J. Preuss, H. Erhorn-Kluttig	Innovative Technologien im Gebäudebereich der Forschungsinitiative ENERGIEWENDEBAUEN	Querauswertung	2023
RWTH Aachen	Y. Zhang, N. Fuchs, L. Maier, D. Müller	Netzdienliche Gebäudekonzepte in den Forschungsprojekten der Förderinitiative Energiewendebauen	Bericht	2024
RWTH Aachen	Y. Zhang, S. Rolles, N. Fuchs, L. Maier, D. Müller	Optimierte netzdienliche Energiesysteme für typische Wohn- und Nichtwohngebäude in Deutschland	Bericht	2024
RWTH Aachen	E. Bauer, N. Fuchs, L. Maier, D. Müller	Lüftungsprojekte in der EWB-Forschungslandschaft	Querauswertung	2024
RWTH Aachen	E. Bauer, N. Fuchs, L. Maier, D. Müller	Wärmepumpen in der EWB-Forschungslandschaft	Querauswertung	2024
Fraunhofer IBP	J. Preuss	Zusammenstellung von kostengünstigen Lösungen im Gebäudebereich der Forschungsinitiative ENERGIEWENDEBAUEN	Querauswertung	2024
Fraunhofer IBP	L. Lyslow, H. Erhorn-Kluttig, J. Schrade, J. Preuss, M. Illner, J. Kaiser, H. Brugger, E. Dütschke, B. Müller, A. Gundlach, Y. Zhang, N. Fuchs, S. Welter, F. Rehman, J. Kegel	Glossar für Begrifflichkeiten aus dem Bereich der energieeffizienten Gebäude - Erweiterung	Glossar	2024
Fraunhofer IBP	L. Lyslow, H. Erhorn-Kluttig	Übersicht von gebäude- und technologiespezifischen Indikatoren für den energieeffizienten Gebäudebereich in Form von Listen und Steckbriefen	Querauswertung	2025
Fraunhofer IBP	H. Erhorn-Kluttig	Erarbeitung von Leitfäden zur Ermittlung von Einspareffekten an Energie und klimaschädlichen Emissionen bei der Umsetzung von Forschungsvorhaben und deren Skalierung	Bericht	2025
Fraunhofer IBP	L. Lyslow, H. Erhorn-Kluttig	Dokumentation und Auswertung der gesammelten Lernerfahrungen aus Forschungsprojekten.	Querauswertung	2025

Tabelle 3: Übersicht über die veröffentlichten Veranstaltungsberichte

Institution	Autor:Innen	Thema/Titel	Art der Publikation	Publikationsjahr
Fraunhofer ISI, RWTH Aachen	I. Brunzema, A. Gundlach, E. Dütschke	Wer baut die Energiewende? Akteure und Netzwerke im Forschungsreich Energiewendebauen	Veranstaltungsbericht	2021
RWTH Aachen, Fraunhofer IBP	Y. Zhang, N. Fuchs, J. Richarz, H. Erhorn-Kluttig, D. Müller	Zukunft der Trinkwasserinstallation und –bereitstellung	Veranstaltungsbericht	2022
RWTH Aachen, Fraunhofer IBP	Y. Zhang, N. Fuchs, J. Richarz, J. Kaiser, H. Erhorn-Kluttig, D. Müller	Sanierung des Gebäudebestands Wärmepumpenausbau & modulare Sanierung	Veranstaltungsbericht	2022
RWTH Aachen	E. Bauer, N. Fuchs, Y. Zhang, D. Müller	Wärmewende im Mehrfamilienhausbestand – Wege aus dem Mietenden-Vermietenden Dilemma	Veranstaltungsbericht	2024

2.5.2 Wissenschaftliche und studentische Arbeiten

Im Rahmen des Projektes wurden verschiedene studentische und wissenschaftliche Arbeiten angefertigt. Eine chronologische Auflistung über die Arbeiten findet sich in Tabelle 4.

Tabelle 4: Liste der betreuten Abschlussarbeiten

Institution	Autor(en)	Thema/Titel	Art der Publikation	Jahr
RWTH Aachen	Jonas Baumgärtner	Entwicklung einer optimierungsbasierten Methodik zur Verbesserung von Förderprogrammen für Wohngebäude	Masterarbeit	2021
RWTH Aachen	Tori Wiederhöft	Optimierung eines netzdienlichen Gebäudebetriebs unter Berücksichtigung der thermischen Behaglichkeit und der Nutzerpräferenz beim Laden des Elektroautos	Bachelorarbeit	2021
RWTH Aachen	Eva Bauer	Auswirkungen der Modellierungstiefe auf die Auslegungsoptimierung von Gebäudeenergiesystemen	Masterarbeit	2022
RWTH Aachen	Menghan Ge	Analyse und Bewertung verschiedener Flexibilitätsoptionen zur Gestaltung netzreaktiver Gebäude	Masterarbeit	2022
RWTH Aachen	Nils Baur	Kosten- und emissionsoptimierte Sanierungsplanung von Wohngebäuden unter Berücksichtigung grauer Emissionen	Bachelorarbeit	2022
RWTH Aachen	Lars Braun	Entwicklung eines Optimierungsmodells für die energetische Sanierung von Mehrfamilienhäusern unter Berücksichtigung der Akteursvielfalt	Masterarbeit	2022
RWTH Aachen	Marius Kulassek	Implementierung eines Aggregationsalgorithmus zur energetischen Abbildung des Wohngebäudebestands in Deutschland zur-	Masterarbeit	2022

		Abschätzung der Effekte energetischer, gebäudeattributsspezifischer Modernisierungsmaßnahmen.		
RWTH Aachen	Alexander Klein	Szenarienbasierte Untersuchung des Einflusses von dynamischen CO ₂ - Faktoren auf den Betrieb und die Emissionen von Gebäudeenergiesystemen	Masterarbeit	2022
RWTH Aachen	Jacqueline Zurke	Optimierungsmodell zur Ressourcenallokation bei Erhöhung der energetischen Modernisierungsrate	Masterarbeit	2023
RWTH Aachen	Simon Rolfes	Modellbasierte Entwicklung optimierter netzdienlicher Gebäudegestaltungen für die in Deutschland typischen Wohn- und Nichtwohngebäude	Masterarbeit	2024
Fraunhofer ISI	Linda Roth	Energy demand modelling with teleworking in three domains (homes, offices and transport)	Masterarbeit	2024

2.5.3 Meilensteinberichte

Im Rahmen des Projektes wurden zu den einzelnen Meilensteinen Berichte angefertigt. Eine chronologische Auflistung findet sich in Tabelle 5.

Tabelle 5: Übersicht über die gelieferten Deliverables

Institution	Thema/Titel	Meilensteinnr.	Jahr
RWTH Aachen	Konzept für die Veröffentlichungen im Rahmen von Modul II	M1.1	2021
RWTH Aachen	Akteurslandkarte	M2.1	2021
Fraunhofer IBP, RWTH Aachen	Definition der gebäudebezogenen Inhalte im neuen Fragebogen der Begleitforschung	M3.1	2021
RWTH Aachen	Einflüsse auf die energetische Gebäudesanierung	M4.1.1	2021
Fraunhofer IBP	Liste der auszuwertenden innovativen Technologien im Rahmen von Modul II	M4.2.1	2021
Fraunhofer IBP	Liste der auszuwertenden Gebäudeprojekte hinsichtlich smarter Technologie und Regelungen im Rahmen von Modul II	M4.3.1	2021
RWTH Aachen	Zusammenfassung von möglichen Flexibilitäts- und Speicheroptionen zur Gestaltung von netzreaktiven Einzelgebäuden	M4.4.1	2021
RWTH Aachen, Fraunhofer ISI	Ermittlung von Hemmnissen der Zielgruppen bei Sanierungsprojekten zur Ableitung von Empfehlungen für eine bessere Einbindung und Erhöhung des Forschungstransfers	M2.2	2022
Fraunhofer IBP	Erste Energie-Indikatoren als Input für die Ermittlung der Einsparpotenziale der Forschungsprojekte EWB in den APs 4.1/4.2/4.3	M3.2	2022
RWTH Aachen	Modell zur Ermittlung von Modernisierungsmaßnahmen	M4.1.2	2022

RWTH Aachen	Berechnungsmodell zur Quantifizierung der netzreaktiven Gestaltungen von Einzelgebäuden	M4.4.2	2022
Fraunhofer ISI	Ableitung und Festlegung der Rahmendaten für die unterschiedlichen Szenarien	M4.5.1	2022
RWTH Aachen	Aufbau eines Berechnungsmodells zur Betrachtung der Auswirkungen regulatorischer und gesetzlicher Rahmenbedingungen	M5.1	2022
RWTH Aachen	Entwicklung eines Berechnungsmodells zur Abschätzung von optimierten Förderbedingungen sowie Gesetzen für einen klimaneutralen Gebäudebestand	M5.2	2023

3 Darstellung der wissenschaftlichen Arbeit

3.1 Arbeitspaket 1 (AP 1): Ergebnistransfer und Austauschformate

Die Verbreitung und fortwährende Verwertung von Forschungserkenntnissen sind von zentraler Bedeutung, um eine nachhaltige Wirkung in der Praxis und der zukünftigen Forschung zu erzielen. Zur Erreichung dieser Ziele wurden im Rahmen dieses Arbeitspaketes zielgruppenorientierte Austauschformate, vor allem die Organisation und Durchführung von Veranstaltungen, wie Workshops und Fokustreffen, organisiert und durchgeführt sowie die erworbenen Erkenntnisse über diverse Kanäle veröffentlicht. Das Arbeitspaket wurde vom Projektpartner RWTH EBC geleitet. Die Veranstaltungen wurden größtenteils von der RWTH EBC initiiert und in Zusammenarbeit mit allen Projektpartnern konzipiert und durchgeführt, z. B. bei der Auswahl der Themen und Projekte für Impulsvorträge. Die Hauptverantwortung für jede Veranstaltung variierte und hing davon ab, aus welchem Arbeitspaket die Themen für Workshops oder Fokustreffen stammten. Die hauptverantwortlichen Projektpartner übernahmen auch die Erstellung der Veranstaltungsdokumentation. Ein ähnliches Vorgehen galt für andere Veröffentlichungen: Die hauptverantwortlichen Partner der jeweiligen Arbeitspakete kümmerten sich um die Inhalte und stimmten das Veröffentlichungsformat mit dem Projektkonsortium ab.

<p>Ziele des Arbeitspakets</p> <ul style="list-style-type: none"> • Definition, Etablierung und Durchführung geeigneter Austauschformate zum zielgruppenspezifischen Transfer wissenschaftlicher Ergebnisse in die Praxis • Steigerung der Breitenwirksamkeit durch gezielt platzierte Veröffentlichungen in passenden Formaten
<p>Methoden</p> <ul style="list-style-type: none"> • Veröffentlichung wissenschaftlicher Ergebnisse über verschiedene Kanäle für unterschiedliche Zielgruppen, darunter die EWB-Website, Fachzeitschriften, wissenschaftlichen Journals und Konferenzen • Zielgruppenorientierter Wissenstransfer durch Veranstaltungen wie Projekttreffen, Fokustreffen und den Kongress der BF • Modulinterner und modulübergreifender Austausch zur Förderung einer gemeinsamen Basis für die BF
<p>Ergebnisse:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Teilnahmen an und Mitgestalten von acht Projekttreffen in Form von Workshops • Organisation und Durchführung von vier Fokustreffen • Präsentation der Erkenntnisse auf zehn nationalen oder internationalen Konferenzen und auf zwei EWB-Kongressen • Regelmäßige modulinterne und modulübergreifende Treffen sowie bedarfsgerechter Austausch mit PtJ und BMWK • Lessons Learned aus der Organisation und Durchführung von unterschiedlichen Austauschformaten <ul style="list-style-type: none"> ○ Die bisherigen Projekttreffen haben sich als zielführendes Austauschformat für die Wissenskommunikation zwischen den Forschungsprojekten erwiesen. ○ Das etablierte jährliche Fokustreffen hat sich als effektiver Weg für den Austausch zwischen Politik, Forschung und Praxis herausgestellt. • Erstellung von 19 Veröffentlichungen auf wissenschaftlichen Papieren (Journal Paper, Konferenzpaper, Fachzeitschriftenbeiträge) • Veröffentlichung von 12 Berichten mit Erkenntnissen aus Querauswertungen oder als Beiträge zur EWB-Forschung, 4 Veranstaltungsberichten und 14 Meilensteinberichten auf EWB-Seite • Betreuung von 11 studentischen Arbeiten

Zur Steigerung der Breitenwirksamkeit der Erkenntnisse aus der Energieforschung wurde im Rahmen von BF-Modul II eine Einteilung der Akteur:Innen in die Gruppen Gesellschaft, Politik, Forschung und Wirtschaft vorgenommen. Besonders relevant ist innerhalb der Gruppe Gesellschaft die Zielgruppe der Nutzer:Innen und Eigentümer:Innen. BF-Innen. BF-Modul II hat in diesem Zusammenhang Akzeptanz- und Partizipationskonzepte (AP 2) zusammen mit Forschungsprojekten erarbeitet und diskutiert.

Die Ansprache bzw. der Austausch zwischen dem BF-Modul II und BMWK/PtJ erfolgte im Rahmen des Lenkungskreises sowie in internen Treffen. Im Mai 2023 präsentierte das BF-Modul II im Rahmen eines Lenkungskreistreffens die Ergebnisse der Handwerksinterviews (AP 4.2) sowie deren Integration in Modernisierungsfahrpläne (AP 4.5). Seit 2022 wurde ein regelmäßiger Austausch zu Modernisierungsstrategien etabliert, der gemeinsam mit den für Forschungsaktivitäten zuständigen BMWK-Referaten sowie dem Referat „Förderung im Gebäudeenergiebereich“ (IIC3) stattfand. Dieser Austausch fokussierte sich auf modellbasierte Modernisierungsentscheidungen unter Berücksichtigung von Modernisierungsfahrplänen, Förderung und Regulatorik. Diese Themen sind Teil der Arbeitspakete AP 4.1, AP 4.5 und AP 5 im BF-Modul II. Ein weiteres Treffen mit den BMWK-Referaten „Förderung im Gebäudeenergiebereich“ (IIC3) und „Energieforschung – Grundsatzfragen und Strategie“ (IIB4) im Dezember 2024 widmete sich dem Mieter:Innen-Vermieter:Innen-Dilemma.

Die Forschungscommunity, bestehend aus Projektleiter:Innen und -bearbeiter:Innen, wurde im Rahmen der Datenakquise (Fragebögen, Monitoringdaten und telefonische Interviews für modulspezifische Fragestellungen) angesprochen und während Veranstaltungen (v. a. Projekte- und Fokustreffen) eingebunden, um Erkenntnisse zu teilen und Dritten und anderen Forscher:Innen bspw. über die EWB-Website zugänglich zu machen. Ein zentraler Bestandteil der Fragebögen war die modulübergreifende Projektbefragung, die im November 2021 an die Zuwendungsempfänger:Innen gesendet wurde, um detaillierte Projektinformationen zu erheben. Der Fragebogen wurde gemeinsam von allen Begleitforschungsmodulen entwickelt, wobei das BF-Team RokiG aufgrund der Vielzahl an Modul-II-Projekten einen besonders großen Beitrag leistete. Die Ergebnisse des Fragebogens bildeten die Grundlage für thematische Querauswertungen und forschende Analysen von BF-Modul II, die halfen, die Projekte zu clustern, ihre Forschungsschwerpunkte sichtbar zu machen und die Vernetzung zu verbessern. Weitere Informationen hierzu sind in AP 3 enthalten. Am Ende des Jahres 2022 wurde eine weitere Komponente der Fragebögen, eine modulübergreifende Expert:Innen-Befragung an alle EWB-Teilprojekte versendet, die sich insgesamt über fünf Themenfelder erstreckte: Forschungsziele, Empfehlungen an die Politik, Forschungslücken, Lernerfahrungen und Hemmnisse. Die Auswertung der Expert:Innen-Befragung wird im AP 3 näher erläutert. Im Frühjahr 2023 wurde seitens BF-Modul II ein so genannter MII-Cluster-Fragebogen erstellt. Der MII-Cluster-Fragebogen stellt eine überarbeitete und deutlich gekürzte Version des Begleitforschungs-Fragebogens des Jahres 2021 dar und wurde mit Fragen des BF-Moduls IV Digitalisierung und des BF-Moduls I Monitoring ergänzt. Der Fragebogen wurde an die seit dem Jahr 2022 neu in die Begleitforschung und BF-Modul II aufgenommenen Projekte und an MII-zugeordnete Projekte, die den ersten Fragebogen nicht beantwortet haben, gesendet, um auch deren Informationen in die Datenstruktur der Begleitforschung einpflegen zu können. Die Ergebnisse wurden in den Querauswertungen danach berücksichtigt. Die Ergebnisse aller Querauswertungen und andere Beiträge von BF-Modul II zur Energieforschung, wie das Glossar zu Begriffen und Technologien der Energieforschung, sowie Leitfäden und Fachbeiträge zu verschiedenen Schwerpunktthemen, wurden auf der EWB-Website veröffentlicht. Die auf der EWB-Website veröffentlichte Inhalte wurden zu Ende 2024 auf die Website der Forschungsnetzwerke migriert und sind dort abrufbar [20]. In Tabelle 2 sind die Beiträge von BF-Modul II auf der EWB-Website zusammengefasst. Darüber hinaus wurde die Forschungscommunity über Veröffentlichungen auf Forschungskonferenzen und mit peer-reviewed Artikeln in wissenschaftlichen Zeitschriften adressiert. In Tabelle 1 ist eine Sammlung der von BF-Modul II veröffentlichten Journalpapers, Konferenzpapieren und Whitepapers gegeben.

Die Wirtschaft spielt eine Schlüsselrolle, da ihre Einbindung die Übertragung der Forschungsergebnisse in die Praxis beschleunigen kann. Bezüglich der Wohnungswirtschaft im Forschungsbereich EWB fanden mehrere Treffen mit Akteur:Innen aus bereits in EWB-Projekten beteiligten Wohnungsbauunternehmen statt. Eine Vernetzung der Unternehmen untereinander wurde von den Unternehmen positiv wahrgenommen, weshalb auch zukünftig weitere Treffen geplant sind. Erkenntnisse zur Einbindung der Wohnungswirtschaft in den Forschungsbereich EWB wurden mit dem Projektträger diskutiert.

Um die breite Masse der Planenden und Ausführenden zu erreichen, wurden ausgewählte Ergebnisse zum Thema Modernisierungsstrategien [11, 12] (AP 4.1) und smarte Gebäudetechnologien [9] (AP 4.3) in der monatlich erscheinenden Zeitschrift „Gebäude-Energieberater“ und Erkenntnisse aus AP 5 zum Thema Einflüsse von Förderung [14] in der Fachzeitschrift „Moderne Gebäudetechnik“ veröffentlicht.

Darüber hinaus wurden die erarbeiteten Ergebnisse der Begleitforschung in der Lehre sowohl durch das Fraunhofer IBP über Vorlesungen an der Universität Stuttgart als auch durch die RWTH Aachen und Fraunhofer ISI über die Betreuung studentischer Abschlussarbeiten (vgl. Tabelle 4) an die Studierenden weitergegeben.

Weitere Details zu den Inhalten der Veröffentlichungen sind im Berichtsteil der jeweiligen Arbeitspakete zu finden. Im Folgenden werden die Projektetreffen mit Fokus auf die von BF-Modul II organisierten Workshops, die Fokustreffen und die von Vertretenden aus BF-Modul II besuchten Konferenzen aufgeführt.

3.1.1 Projektetreffen und Workshops

Im Zeitraum von Oktober 2020 bis Dezember 2024 wurden insgesamt acht reguläre Projektetreffen und ein kleines Projektetreffen durchgeführt. Die Treffen fanden sowohl in digitaler als auch in physischer oder hybrider Form statt. Ziel dieser Treffen war es, aktuelle Forschungsergebnisse vorzustellen, den Austausch zwischen Projekten zu fördern und neue Impulse für die Energiewendebegleitung zu setzen.

Im November 2020 wurde die neue Struktur der Wissenschaftlichen Begleitforschung im Rahmen eines „kleinen“ Projektetreffens vorgestellt. Im April 2021 hat das neunte Projektetreffen als digitales Format stattgefunden. Der Vormittag begann mit zwei externen Impulsvorträgen und Präsentationen der BF-Module, während am Nachmittag spezifische Workshops der BF-Module stattfanden. BF-Modul II widmete sich dem Thema „Einspareffekte im Bereich EWB – Potenziale bei Energie und klimaschädlichen Emissionen“. Anhand von drei Präsentationen erhielten die Teilnehmenden in der ersten Hälfte des Workshops Informationen zu den bisherigen Arbeiten der Begleitforschung sowie einen Einblick in unterschiedliche Bilanzierungsmethoden zur Abschätzung von Energie- und Treibhausgas-Einspareffekten. An die Impulsvorträge schloss sich eine Diskussion in Kleingruppen an. In den Diskussionen wurde deutlich, an welcher Stelle von den Projektverantwortlichen Hindernisse in der Bilanzierung der Ermittlung der THG-Einsparpotentiale und Unterstützungsbedarf durch die Begleitforschung gesehen werden. Als wesentliche Herausforderung wurde aufgrund der Heterogenität der Projektlandschaft die Definition einheitlicher Referenzen für alle Projekte identifiziert und in ihrer Umsetzung diskutiert.

Im November 2021 fand das zehnte Projektetreffen weiterhin als digitales Format statt. Am ersten Tag wurden in einer gemeinsamen Präsentation der BF-Module, die Angebote der BF für die Projekte sowie erste Ergebnisse des Fragebogens vorgestellt. Des Weiteren gab es Kurzvorträge (Elevator-Pitches), in denen mehrere Projekte ihre Erkenntnisse in kompakter Form vorstellen konnten. BF-Modul II hat hier zur Auswahl der Projekte beigetragen, die sich für dieses Format gemeldet hatten, und die Moderation einer anschließenden thematischen Diskussion übernommen. Am zweiten Tag wurden Workshops durchgeführt, wobei BF-Modul II das Thema „Kernaufgabe Bestandssanierung – Herausforderungen und Chancen“ behandelte. Einleitend wurden aktuelle Ergebnisse aus BF-Modul II vorgestellt, gefolgt

von Vorträgen zweier Projekte, die Impulse für die anschließenden Diskussionsrunden gaben. Im Rahmen von wechselnden digitalen Diskussionsrunden (World-Café) wurde zu den Themen „Einflüsse auf die Sanierung“, „Zukunftstechnologien für die Sanierung“ sowie „Mieter:Innen-Vermieter:Innen-Dilemma“ in wechselnder Teilnehmer:Innen-Zusammensetzung diskutiert.

Im April 2022 fand das 11. Projektetreffen, wieder als digitales Format, statt. Der erste Tag stand im Zeichen einer gemeinsamen Präsentation der BF-Module II bis IV zum Thema Gebäudebetrieb. Hierbei wurde auch die aktuelle Situation zur Notwendigkeit größerer Unabhängigkeit von Gasimporten aus Russland thematisiert und dargestellt, welchen Anteil der Gebäudebereich an den aktuellen Importen hat und welche Maßnahmen zur Einsparung beitragen können. In diesem Zusammenhang wurde anschließend ein Kurz-Fragebogen an alle Teilnehmenden des Projektetreffens sowie im Nachgang an alle EWB-Projekte versendet, um weitere Maßnahmen abzufragen. Über 70 Maßnahmen (inkl. doppelter Nennungen) kamen so zusammen. Am zweiten Tag standen die Workshops der BF-Module im Vordergrund. Seitens BF-Modul II standen zwei Themen auf dem Programm. Zum Thema „Smarter und flexibler Gebäudebetrieb – Treiber und Unterstützer der Energiewende“, erfolgte die Einleitung in den Workshop durch einen Vortrag von BF-Modul II mit einer Vorstellung der aktuellen Ergebnisse der Arbeiten aus BF-Modul II in den Bereichen smarte Gebäudetechnologien und netzdienlicher Gebäudebetrieb. In den anschließenden zwei Projektvorträgen wurden die Projektergebnisse jeweils zu einem smarten Heizsystemregelungsalgorithmus und einem Ansatz für den netz- sowie marktdienlichen Einsatz der Anlagen in Gebäuden präsentiert. Diese Erkenntnisse gaben weitere Impulse für die danach folgenden Diskussionsrunden. Im Rahmen von zwei parallelen Diskussionsrunden wurde zu den Themen „Ziele, Mehrwerte, Eigenschaften und Umsetzungsvoraussetzung von netzdienlichen Gebäuden“ und „Smarte Regelungstechnologien und deren Einsparpotentiale“ diskutiert. Der zweite Workshop zum Thema „Partizipative Entwicklung von Zukunftsannahmen für einen klimaneutralen Gebäudebestand“ bestand aus einer kurzen Einführung mit einem Überblick über den Stand der Szenarientwicklung und einer Diskussion der Zukunftsannahmen mit der Bearbeitung von insgesamt vier ausgewählten Schlüsselfaktoren für die Szenarien. In diesem Workshop wurden mögliche Faktoren, die einen Einfluss auf die Entwicklung des Gebäudebestandes haben sowie die Wechselwirkung zwischen den Faktoren mit den Teilnehmenden diskutiert und bewertet und denkbare Entwicklungen der Faktoren in Form von Zukunftsannahmen formuliert.

Im November 2022 fand das 12. Projektetreffen in Petershagen statt. Am ersten Tag präsentierten die BF-Module II-IV ihre aktuellen und zukünftigen Tätigkeiten in der Begleitforschung, gefolgt von Projektvorstellungen, bei denen die Forschungsarbeiten der Projekte gezeigt wurden. Am zweiten Tag standen die Workshops der BF-Module im Fokus. BF-Modul II führte einen Workshop zum Thema „Innovative Gebäudetechnologien“ durch. Die Veranstaltung fand hybrid statt, sodass sowohl vor Ort als auch digital teilgenommen werden konnte. Ein Impulsvortrag seitens BF-Modul II, basierend auf einer laufenden Querauswertung, eröffnete die Veranstaltung. Anschließend stellten sechs Projekte, entweder digital oder vor Ort, ihre Methoden und Erkenntnisse zu Technologieentwicklungsprojekten vor. Nach den Einzelvorträgen gab es eine gemeinsame Diskussion, die in einer SWOT-Analyse mündete. Dabei wurden technologieübergreifend Stärken, Schwächen, Chancen und Risiken gesammelt und auf einem Poster zusammengefasst.

Im April 2023 wurde das 13. Projektetreffen in Dresden abgehalten. Am ersten Tag hielten die BF-Module II, III und IV eine gemeinsame Präsentation zu aktuellen und zukünftigen Tätigkeiten. Verschiedene Projekte nutzten die Gelegenheit, ihre Forschungsergebnisse vorzustellen. Am zweiten Tag fanden Workshops statt, bei denen sich mehrere Vertreter:Innen von BF-Modul II beteiligten. In den Workshops standen der Austausch und die Vernetzung zwischen den Projekten im Vordergrund.

Im November 2023 diente das 14. Projektetreffen in Bamberg insbesondere der Vernetzung innerhalb der EWB-Forschungsgemeinschaft. Seitens BF-Modul II nahmen mehrere Personen am Projektetreffen

teil und beteiligten sich an den Workshops sowie an der Vorbereitung der Diskussionen zum Offboarding der Forschungsprojekte. Die Rückmeldungen der Diskussionen zum Offboarding sind in die laufenden Arbeiten der Arbeitsgruppe ein geflossen.

Im April 2024 wurde das 15. Projektetreffen in Kassel abgehalten. BF-Modul II präsentierte in einem Workshop den entwickelten Szenariengenerator und führte die Teilnehmenden durch die Szenarientwicklung und Modellierung. Ziel des Workshops war es, die Anwendungsmöglichkeiten des Tools zu demonstrieren und Feedback aus der Forschungscommunity einzuholen.

Das 16. Projektetreffen fand im November 2024 in München statt und wurde inhaltlich von BF-Modul II mitgestaltet. BF-Modul II war intensiv an der Auswahl der Projekte und Themen für die Thementische beteiligt. Das Projektetreffen wurde von BF-Modul II genutzt, um Teil der Kernkenntnisse und -ergebnisse der letzten vier Jahre in Form von drei Postern und einer Präsentation vorzustellen. Vertreter:Innen aus BF-Modul II nahmen aktiv und unterstützend für die Thementischeleiter:Innen an den Diskussionen an den Thementischen sowie an der Podiumsdiskussion teil.

Die Diskussionen und Ergebnisse der von BF-Modul II organisierten und durchgeführten Workshops wurden in den Gesamt-Veranstaltungsberichten dokumentiert und auf der EWB-Website veröffentlicht.

3.1.2 Fokustreffen

Ergänzend zu den Projektetreffen, die ein breites Publikum adressieren, wurden im Rahmen von BF-Modul II jährliche Fokustreffen etabliert. Diese Veranstaltungen zielen auf einen detaillierten thematischen Austausch mit spezifischen Zielgruppen aus Forschung, Praxis und Politik ab. Ziel ist es, neue Forschungserkenntnisse und -entwicklungen zu teilen und durch die themenbezogene Vernetzung einen nachhaltigen Austausch anzustoßen.

Das erste Fokustreffen fand im November 2021 unter dem Titel „Wer baut die Energiewende? – Akteure und Netzwerke im Forschungsbereich EWB“ statt. Seitens RokiG wurde im Vorfeld der Veranstaltung eine Akteursdefinition erarbeitet, in der die Frage zu beantworten ist: „Welche Akteur:Innen müssen angesprochen werden?“. Ergänzend wurde eine erste Analyse zu den eingebundenen Akteur:Innen in den Forschungsprojekten durchgeführt und auf dem Fokustreffen präsentiert. Die ausgewählten Projekte brachten anschließend ihren Input in die Veranstaltung ein, in dem sie ihre Erfahrungen in Bezug auf die geplanten bzw. durchgeführten Formen der Akteureinbindung präsentierten. Ziel der Veranstaltung war es, gemeinsam Lessons Learned zur Akzeptanz und Akteur:Innen-Ansprache zu erarbeiten. Weitere Informationen sind im Berichtsteil zu AP 2 enthalten.

Das zweite Fokustreffen zum Thema „Zukunft der Trink(warm)wasserinstallation“ wurde im Februar 2022 digital abgehalten. Hierzu wurden gemeinsam mit dem PtJ ein Konzept und eine Agenda erstellt. Vier Referent:Innen aus Forschungsprojekten zu diesem Thema konnten für Vorträge gewonnen werden sowie zwei weitere für die Moderation von Diskussionsgruppen. Weitere Vorträge durch zwei Verbände waren Inhalt der Veranstaltung. Anschließend wurde in zwei parallelen Diskussionsgruppen zu „Energieeffizienz und Hygiene in der Trinkwasserinstallation“ und „Trinkwasserinstallation im Bestand“ diskutiert. Über 260 Teilnehmende aus den Bereichen Forschung, Praxis und Politik wählten sich zu diesem Treffen ein, womit das zentrale Ziel des Treffens, der Transfer der Forschungserkenntnisse in die Praxis und Normung, erreicht werden konnte.

Im Oktober 2022 folgte das dritte Fokustreffen zum Thema „Energetische Gebäudesanierung – Chancen und Herausforderungen des Wärmepumpenausbaus und der modularen Sanierung zur Dekarbonisierung des Gebäudebestands“ in digitaler Form. Ein Einführungsvortrag von BF-Modul II zu den zentralen Hebeln der energetischen Gebäudesanierung leitete in das Treffen ein. Zwei Referenten aus For-

schungsprojekten konnten zu den fokussierten Themen für anschließende Vorträge gewonnen werden. Danach wurde in zwei parallelen Gruppen zu den beiden fokussierten Themen diskutiert, wobei zunächst kurze Impulsvorträge von BF-Modul II den aktuellen Stand der Forschung zusammenfassten. Rund 180 Teilnehmende aus den Bereichen Forschung, Praxis und Politik partizipierten an diesem Treffen, womit das zentrale Ziel, der Transfer der Forschungserkenntnisse in die Praxis, erreicht werden konnte.

Im Mai 2024 wurde das vierte Fokustreffen unter dem Titel „Wärmewende im Mehrfamilienhausbestand“ von BF-Modul II organisiert. Forschungsprojekte sowie Vertreter:Innen der Mieter- und Immobilienwirtschaft nutzten die Gelegenheit, ihre Erkenntnisse und Empfehlungen zur Modernisierung des Mehrfamilienhausbestands vorzustellen. Neben einem Forschungsprojekt aus dem Forschungsbereich EWB wurde erstmals auch einem Forschungsprojekt aus dem Förderschwerpunkt „Energiewende und Gesellschaft“ Raum zur Präsentation gegeben, um die Vernetzung der Förderschwerpunkte zu verbessern. BF-Modul II brachte die Erkenntnisse aus den modellbasierten Auswertungen der AP 4.1 und 5 als Diskussionsgrundlage in die Veranstaltung ein und moderierte die Veranstaltung. Die Ergebnisse der modellbasierten Auswertungen konnten weiterhin in einer Workshopreihe des BMWK zu Wärmepumpenlösungen in Mehrfamilienhäusern vorgestellt werden.

Für die Fokustreffen wurden umfassende Berichte erstellt und auf der EWB-Website veröffentlicht (vgl. Tabelle 3).

3.1.3 Konferenzen

Im Rahmen des internationalen und nationalen Austauschs nahm BF-Modul II an mehreren Konferenzen teil, um Forschungsergebnisse vorzustellen und mit Fachleuten zu diskutieren. Diese Veranstaltungen boten auch die Möglichkeit zur Vernetzung mit anderen Expert:Innen und Wissenschaftler:Innen.

Bei den Berliner Energietagen im Juni 2022 nutzten Vertreter:Innen des BF-Moduls 2 die Möglichkeit, sich tiefer mit der Forschungslandschaft im Bereich EWB auseinanderzusetzen. Die Veranstaltung bot darüber hinaus die Möglichkeit zum wissenschaftlichen Austausch, zur Diskussion, und zur Vernetzung mit anderen Forschenden. Interessante Inputs wurden zu den Themen innovativer Technologien, den regulatorischen Rahmenbedingungen aus Sicht politischer Entscheidungsträger und auftretenden Hemmnissen in Demonstrationsprojekten und den Laboren der Energiewende gewonnen. Der Besuch bot darüber hinaus die Möglichkeit der modul-übergreifenden Vernetzung innerhalb der Begleitforschung in Präsenz.

Im Juli 2022 besuchte Jan Richarz die „International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems (ECOS)“ in Kopenhagen. Dort stellte er Methoden und Ergebnisse zu Modernisierungsfahrplänen vor, die im Rahmen von AP 4.5 entwickelt wurden. Diese Präsentation fand vor einem internationalen Publikum statt, das sich mit Fragen der Energieeffizienz und Systemoptimierung beschäftigt.

Im September 2022 präsentierte Yizhuo Zhang auf der BauSIM-Konferenz in Weimar Ergebnisse zur Betriebsoptimierung eines netzdienlichen Wohngebäudeenergiesystems unter Berücksichtigung der Nutzerpräferenzen (weitere Informationen im Abschnitt zu AP 4.4). Dieser Vortrag bot eine Gelegenheit, die spezifischen Forschungsansätze und -methoden von BF-Modul II mit anderen Forschenden im Bereich Gebäudesimulation zu diskutieren.

Im November 2022 nahm Jan Richarz für BF-Modul II an der Veranstaltung „Heizen ohne Erdgas: Regenerativ betriebene Brennstoffzellen als Unterstützung für die Wärmepumpe?“ [21] des Deutschen Biomasseforschungszentrums (DBFZ) teil und hielt dort einen auf den Arbeiten des BF-Modul II basierenden Vortrag zum Energiebedarf im Gebäudebestand, der Entwicklung des Wärmepumpenmarkts sowie dem Einsatz von Wärmepumpen im Bestand.

Im Juni 2022 fand die Konferenz des „European Council for an Energy Efficient Economy (Eceee)“ in Hyères (FR) statt, bei der Iska Brunzema die bisherigen Ergebnisse der Akteur:Innen-Analyse aus AP 2 vorstellte und diskutierte.

Der EWB-Kongress 2022, der im Juni in Wuppertal stattfand, wurde von BF-Modul II auf konzeptioneller Ebene mitgestaltet. BF-Modul II war an der Planung des Kongressprogramms beteiligt, bereitete eine gemeinsame Keynote mit den BF-Modulen III und IV vor und organisierte eine Vortragsreihe, in der Highlight-Projekte aus den Bereichen Sanierung und Wärmewende präsentiert wurden. Auf dem Expo-Forum des Kongresses leitete BF-Modul II eine Sitzung zur Gebäudehülle.

Im Juli 2023 stellte Jan Richarz die Arbeiten von BF-Modul II zu Modernisierungsfahrplänen (AP 4.5) auf dem TGA-Kongress in Berlin vor. Diese Veranstaltung bot eine Plattform, um die Forschungsergebnisse von BF-Modul II einer breiteren Fachöffentlichkeit vorzustellen und Rückmeldungen aus der Praxis zu erhalten.

Außerdem präsentierte Nico Fuchs im Juli 2023 aktuelle Arbeiten zum Aufbau des Fördermitteloptimierungsmodells aus AP 5 auf der „International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems (ECOS)“ in Gran Canaria.

Die modellbasierten Erkenntnisse zu Optimierungsentscheidungen von Gebäudeenergiesystemen der Begleitforschung konnten weiterhin im März 2024 auf der E.ON Wärmekonferenz einer deutschen Fachöffentlichkeit präsentiert werden.

Zur Präsentation der EWB-Forschungsarbeit diente auch der EWB-Kongress 2024 in Frankfurt, auf dem BF-Modul II mit verschiedenen Personen vertreten war. Inhaltlich leitete BF-Modul II eine Vortragsreihe und eine Podiumsdiskussion zu aktuellen Forschungsthemen im Forschungsbereich und beteiligte sich weiterhin am Standdienst des EWB-Messestandes. Zusätzlich hielt Jessica Preuss einen Einleitungsvortrag zum Messerundgang zu innovativen Gebäudetechnologien auf Basis der Arbeiten in AP 4.2.

Im Juni 2024 wurden die Arbeiten aus AP 4.5 im Rahmen von zwei Vorträgen auf der Konferenz des „European Council for an Energy Efficient Economy (Eceee)“ in Chamouille (FR) präsentiert und mit einem internationalen Publikum diskutiert. Mahsa Bagheri stellte den Prozess und die Ergebnisse der partizipativen Szenarientwicklung vor und Şirin Alibaş präsentierte die Methoden und Ergebnisse der Gebäudebestandsentwicklung, die für die Szenarienberechnung im AP 4.5 verwendet wurden.

Außerdem besuchte Şirin Alibaş im Oktober 2024 die „European Climate and Energy Modelling Platform 2024 (ECEMP)“ in Brüssel und präsentierte die Szenarienergebnisse aus AP 4.5.

3.1.4 Modulinterner und modulübergreifender Austausch

Der modulinterne Austausch wurde durch regelmäßige Treffen der Partner von BF-Modul II (alle vier Wochen) sowie bedarfsorientierte Treffen mit dem Projektträger strukturiert. Diese Treffen dienten der Abstimmung von Aufgaben, Fortschrittskontrollen und der Planung von Veranstaltungen.

Ergänzend zu diesen modulinternen Treffen haben weitere Treffen/Veranstaltungen zwischen den BF-Modulen stattgefunden. Hierzu gehört ein seit 2021 stattfindender monatlicher Austausch der BF-Modulleitenden zur Planung modulübergreifender Tätigkeiten. Weitere Treffen dieses Formats fanden zur tiefergehenden Planung gemeinsamer Veranstaltungen, v. a. der Kongresse und der Projektetreffen sowie zur Planung des Fragebogen-Updates statt.

Im März 2023 wurden im Rahmen eines Konsortialtreffens mehrere Arbeitsgruppen gebildet, um die Zusammenarbeit zwischen den Modulen weiter zu stärken. Eine Arbeitsgruppe entwickelte ein Off-

boarding-Format für auslaufende EWB-Projekte, das im November 2023 auf dem Projektleitungstreffen in Bamberg vorgestellt wurde. Eine weitere Arbeitsgruppe beschäftigte sich mit der besseren Sichtbarkeit und Nutzung der Werkzeuge der Begleitforschung. BF-Modul II beteiligte sich aktiv an diesen Diskussionen und trug dazu bei, ein übergreifendes Schema für die Produkte der Begleitforschung zu entwickeln. Ein Thementisch auf dem Konsortialtreffen im März 2023, geleitet von BF-Modul II, fokussierte sich auf Einsparpotenziale der Forschungsprojekte. Hier tauschten sich die BF-Module II, III und IV zu den unterschiedlichen Bewertungsansätzen im Bereich der Gebäudeprojekte (Bewertungsmethode in Leitfäden für unterschiedliche Projekttypen), der Quartiersprojekte (Quartiersgenerator) und der digitalen Projekte (Umwelteffekte digitaler Anwendungen) aus.

3.2 Arbeitspaket 2 (AP 2): Akzeptanz und Partizipation

Um die Sanierungsraten und die Energieeinsparungen bei Wohn- und Nichtwohngebäuden zu erhöhen, ist eine enge Zusammenarbeit verschiedener Akteur:Innen in allen Phasen des Sanierungsprozesses erforderlich:

- Initiierungs- und Informationsphase: Investor:Innen entwickeln die Idee zur Sanierung und sammeln Informationen.
- Entscheidungsphase: Entscheidungen zu Maßnahmen, Technologien und Umfang der Sanierung werden getroffen.
- Implementierungsphase: Die Umsetzung der Sanierung birgt Risiken wie mangelnde Koordination zwischen Gewerken.
- Nutzungsphase: Die alltägliche Nutzung der neuen Technologien beeinflusst maßgeblich die Energieeinsparungen.

Die Bearbeitung des Arbeitspakets erfolgte durch RWTH EBC und das Fraunhofer ISI, wobei letzteres hauptsächlich an der Akteur:Innen-Landkarte und der Netzwerkanalyse beteiligt waren.

<p>Ziele des Arbeitspakets</p> <ul style="list-style-type: none"> • Identifikation der Rollen relevanter Akteur:Innen • Erarbeitung von Erfolgsfaktoren und Hemmnissen bei der Durchführung von Projekten, die bestimmten Akteur:Innen-Gruppen zugeordnet werden können • Untersuchung der Art und Wirksamkeit von angewandten Partizipationskonzepten in Forschungsprojekten
<p>Methoden</p> <ul style="list-style-type: none"> • Entwicklung einer Akteur:Innen-Landkarte • Durchführung von Fokustreffen • Durchführung von Interviews und Befragungen • Analyse der Projektlandschaft
<p>Ergebnisse:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Relevante Akteur:Innen (Wohnungswirtschaft, Nutzer:Innen) sind in der Forschung nicht ausreichend vertreten. • Unternehmen aus der Praxis sind in den untersuchten EWB-Projekten gut repräsentiert. • Projektpartner:Innen aus dem Bereich der Genossenschaften zeigen großes Interesse an den Ergebnissen der Projekte, in welchen sie Teil waren, und wollen die Inhalte gerne weiter einsetzen und skalieren. • Die Verbreitung von Erkenntnissen aus den Projekten muss verbessert werden. • Nutzer:Innen greifen vor allem in folgende Bereiche innerhalb des Gebäudesystems ein: Heizen und Kühlen, Beleuchtung und Verschattung, Lüftung. • Relevante sozioökonomische Einflussfaktoren auf das Nutzer:Innen-Verhalten sind insbesondere verfügbare Informationen sowie die persönliche Einstellung. • Die intuitive Bedienbarkeit von Geräten zeigt sich als relevanter technischer Einflussfaktoren auf das Nutzer:Innen-Verhalten.

- Einfachere und direktere Möglichkeiten zur Interaktion mit der Gebäudetechnik sowie optimierte Rückmeldesysteme zu den Auswirkungen des Nutzer:Innen-Verhaltens stellen wesentliche Verbesserungsmöglichkeiten dar,
- Die Stärkung der Kommunikation und Interaktion zwischen Forschung, Praxis und Nutzer:Innen ist notwendig.
- Ein effektiver Wissenstransfer aus den Forschungsprojekten heraus ist essentiell für die Umsetzung der Energiewende im Gebäudesektor.

Wichtige Akteur:Innen sind Investor:Innen und Nutzer:Innen, welche sich in Mietgebäuden oft unterscheiden, und Intermediär:Innen, wie Energieberater:Innen, Architekt:Innen oder Handwerker:Innen. Partizipationskonzepte sollen Nutzer:Innen-Bedürfnisse frühzeitig einbeziehen, um Hemmnissen, wie mangelnde Akzeptanz oder organisatorische Herausforderungen, entgegenzuwirken.

Basierend auf Diskussionen und Publikationen wurde eine Akteur:Innen-Landkarte erstellt, ergänzt durch Fachgespräche. Ziel ist es, Erfolgsfaktoren zu identifizieren, sozioökonomische Hemmnisse zu analysieren und partizipative Lösungsansätze zu entwickeln. Mittels Workshops und Fragebogenanalysen wurden bereits eingesetzte Partizipationskonzepte untersucht, um Empfehlungen für Akteur:Innen zu formulieren.

Zudem wurde das Nutzer:Innen-Verhalten analysiert: Es soll ein Gleichgewicht zwischen Nutzer:Innen-Komfort und Effizienz des Energiesystems erreicht werden. Ansätze wie "Nudges" könnten Verhaltensänderungen fördern, um Energieeinsparungen ohne strikte Vorgaben zu erzielen.

Vorbereitend zur Erstellung der Akteur:Innen-Landkarte wurde in einigen Treffen ein Arbeitsplan erstellt und Schnittstellen mit Modul III identifiziert. Folgendes Vorgehen wurde festgelegt:

- Kategorisierung der betreuten Projekte nach Rechtsform und Branche der Projektnehmer:Innen: Übersicht über Anzahl privatwirtschaftlicher, öffentlich-rechtlicher und zivilgesellschaftlicher Akteur:Innen im Forschungsbereich
- Durchführung einer umfassenden Netzwerkanalyse mit dem Ziel die Vernetzung des Forschungsbereichs mit anderen Akteur:Innen, insbesondere aus der Privatwirtschaft, abzubilden, die Qualität dieser Verbindungen zu bewerten sowie Empfehlungen für effektivere Netzwerke zu erarbeiten.

Die Kategorisierung und die Netzwerkanalyse wurden mit dem ersten Meilenstein MS 2.1 „Akteurslandkarte mit Akteursgruppen-spezifischen Erfolgsfaktoren und Hemmnissen“ erfolgreich abgeschlossen. Ein besonderer Fokus lag auf der Vernetzung zwischen Wissenschaft und Praxis. Als Teil der Kategorisierung wurden die zwischen den Zuwendungsempfänger:Innen bestehenden Projektpartnerschaften untersucht. Die Kategorisierung ergab, dass die meisten Akteur:Innen aus dem privatwirtschaftlichen Bereich (66 %) kommen, gefolgt vom öffentlich-rechtlichen (22 %) und zivilgesellschaftlichen (12 %). Im Bereich der privatwirtschaftlichen Akteur:Innen zählt gut ein Drittel zu Komponentenersteller:Innen aus dem Bereich der Anlagen- und Gebäudetechnik und es folgt das Baugewerbe mit etwa 15 %. Wohnungs- und Immobilienunternehmen machen nur knapp 7 % aus. Den Großteil der öffentlich-rechtlichen Akteur:Innen machen Universitäten und Forschungseinrichtungen aus (70 %), außerdem können dieser Kategorie Stadtwerke (17 %) und Kommunen (13 %) zugeordnet werden. Auch bei den zivilgesellschaftlichen Akteur:Innen kommt der Großteil der Akteur:Innen aus der Forschung (77 %). Der Rest wird von Interessensgruppen gebildet. Im Rahmen der Netzwerkanalyse wurden Muster der Zusammenarbeit zwischen den verschiedenen Akteur:Innen-Typen herausgearbeitet. Die Mehrheit der Akteur:Innen (78 %) ist nur an einem Projekt beteiligt. Die Akteur:Innen, welche an mehreren Projekten beteiligt sind, kommen hauptsächlich aus dem Bereich der Forschungseinrichtungen. Diese Akteur:Innen sorgen dafür, dass das Netzwerk im Kern eng verbunden ist. Grundsätzlich stellte sich heraus, dass in fast allen Projekten mindestens ein oder eine Praxispartner:In eingebunden ist. [22]

Die Ergebnisse wurden als inhaltliche Grundlage für das erste Fokustreffen von Modul II mit dem Thema „Wer baut die Energiewende? Akteure und Netzwerke im Forschungsbereich Energiewendebauen“ genutzt und diskutiert. Darauf aufbauend wurde erarbeitet, welche Akteur:Innen-Gruppen im Forschungsbereich fehlen, welche Hemmnisse beim Wissenstransfer bestehen und wie diesen begegnet werden kann. [23]

Im Folgenden werden wichtige Ergebnisse des Fokustreffens aufgezählt:

- Akteur:Innen-Analyse berücksichtigt nur Strukturen und Kooperationen aus geförderten Projekten
- Nutzende und Eigentümer:Innen sind in Projekten unterrepräsentiert, da Einbindung schwer
- Qualität von Wissensaustausch und Bereitstellung von Daten/Ergebnissen abhängig von Akteur:Innen
- Aufbereitung und Verbreitung von Ergebnissen oft unbefriedigend und nicht Zielgruppen-gerecht
- Fehlendes Interesse und Verständnis für Relevanz behindern/verzögern Start von Projekten

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Kommunikation der Projektergebnisse verbessert werden muss, um diese wirtschaftlich verwerten und Projekteinhalte skalieren zu können. Außerdem sollte der Austausch zwischen den Akteur:Innen gestärkt werden. Dafür müssen Zeit und Kapazitäten entsprechend eingeplant werden.

Der zweite Meilenstein MS 2.2 „Ermittlung von Hemmnissen der Zielgruppen bei Sanierungsprojekten zur Ableitung von Empfehlungen für eine bessere Einbindung und Erhöhung des Forschungstransfers“ befasste sich mit der Erfassung von Hemmnissen verschiedener Zielgruppen bei Sanierungen. Basierend auf den Ergebnissen der Akteur:Innen-Analyse wurde das im Antrag formulierte Konzept evaluiert und angepasst. Ursprünglich war geplant einen Leitfaden zur Umsetzung von Partizipationsmaßnahmen bei Sanierungen zu entwickeln. Im Rahmen des Fokustreffens wurden als wichtigste Gütekriterien von Praxisleitfäden eine klare Definition der Adressaten sowie ein umfassendes Kommunikationskonzept, um diese Zielgruppe zu erreichen und zur Verwendung des Leitfadens anzuregen, in einer Diskussion mit den Teilnehmer:Innen abgeleitet. Der wichtigste Adressat eines Partizipationsleitfadens für Sanierungen ist die Immobilienbranche. Die Ergebnisse der Akteur:Innen-Analyse zeigen jedoch, dass diese im Forschungsbereich wenig vertreten sind. Um diese wichtigen Adressaten stärker zu fokussieren, wurde beschlossen, Ziel und Inhalt der Auswertung entsprechend anzupassen. Konkret sollen Hemmnisse und Erfolgsfaktoren bei der Einbindung von Wohnungsunternehmen in den Forschungsbereich ermittelt werden. Dafür wurden Interviews mit Zuwendungsempfänger:Innen, insbesondere mit Wohnungsunternehmen und Projektleitenden aus der Forschung, welche mit der Branche zusammenarbeiten, durchgeführt, um deren Einbindung in den Forschungsbereich zu untersuchen. Die Ergebnisse der Akteur:Innen-Analyse haben gezeigt, dass bestimmte Branchen im Forschungsbereich häufig, andere wenig oder gar nicht repräsentiert sind.

Wie bereits beschrieben macht der Anteil der Wohnungs- und Immobilienwirtschaft unter den Forschungsnehmenden mit 7 % nur einen kleinen Teil der Praxispartner:Innen aus und Mieter:Innen sowie Gebäudenutzer:Innen sind im Forschungsbereich gar nicht direkt repräsentiert. Aufgrund ihrer großen Relevanz für die Gebäudeenergiewende wurde die Einbindung der Immobilienwirtschaft sowie der Gebäudenutzer:Innen in Projekten näher untersucht. Hierfür wurde ermittelt, welche Eigentümer:Innentypen im Forschungsbereich vertreten sind, ob und inwiefern Gebäudenutzer:Innen indirekt in Projekte eingebunden sind und wie dies den Transfer von Forschungsergebnissen beeinflusst. Der Fokus lag dabei auf Maßnahmen im Wohngebäudesektor.

Um einen Überblick darüber zu geben, welche Gebäudeeigentümer:Innentypen im Forschungsbereich repräsentiert sind, wurde in einem ersten Schritt untersucht welche Akteur:Innen direkt als Zuwen-

dungsempfänger:Innen vertreten sind. In einem zweiten Schritt wurden die dem Modul II zugeordneten Demonstrationsvorhaben, insbesondere im Hinblick auf die Eigentumsverhältnisse, analysiert. Abschließend wurde beurteilt, inwieweit diese Eigentümer:Innen-Struktur repräsentativ für den Gebäudebestand in Deutschland ist.

Um Hemmnisse beim Forschungstransfer zu ermitteln, wurden darüber hinaus Interviews mit Projektleiter:Innen geführt. Hierfür wurden alle sechzehn, im Forschungsbereich vertretenen Wohnungsunternehmen, angefragt und letztlich sieben Interviews in semi-strukturierter Form geführt. Ergänzend fanden informelle Befragungen von Projektleiter:Innen statt. Inhaltlich zielten die Fragen auf Aspekte der Zusammenarbeit mit Forschungspartner:Innen, die Motivation für eine Mitwirkung im Forschungsprojekt, Erfahrungen mit den administrativen Projektanforderungen sowie die Einbindung von Mieter:Innen in die Projekte ab. Auf Basis der Interviewergebnisse wurden Empfehlungen für verschiedene Zielgruppen abgeleitet: für die Fördergeber:Innen, für Wohnungsunternehmen sowie für Projektkonsortien als Ganzes.

Aus den Interviews konnte abgeleitet werden, dass die Eigenmotivation der befragten Unternehmen, im Forschungsprojekt mitzuwirken, sehr hoch war. In einem Fall wurde das Projekt sogar von einer Genossenschaft initiiert. Weitere Unternehmen wurden von Praxispartner:Innen angefragt oder haben selbst aktiv nach Kooperationen gesucht. Auch direkte Kontakte zwischen Forschung und Unternehmen waren ausschlaggebend für die Teilnahme am Projekt. Die Ergebnisse zeigten außerdem, dass auch hier private Eigentümer:Innen, und damit die Eigentümer:Innen-Gruppe, welche den höchsten Anteil des Wohngebäudebestandes in Deutschland hält, im Forschungsbereich wenig repräsentiert waren. Unter den dem Modul II zugeordneten Projekten sind drei Demonstrationsvorhaben, in deren Rahmen Anlagen in Einfamilienhäusern in Privatbesitz installiert wurden. Eigentümer:Innen-Gemeinschaften sind nicht vertreten. Unter den professionellen Anbieter:Innen im Forschungsbereich finden sich kommunale Unternehmen, Genossenschaften und privatwirtschaftliche Unternehmen.

Die Zusammenarbeit mit der Forschung wurde seitens der Unternehmen überwiegend positiv bewertet. Mehrfach genannte Hemmnisse betrafen die Projektadministration und die kontinuierlichen Nachweispflichten. Darüber hinaus wurde in den Interviews deutlich, dass die Rolle, welche Wohnungsunternehmen hinsichtlich des Forschungstransfers einnehmen, variiert. Bei den befragten Genossenschaften stellte sich heraus, dass diese den Input aus den Forschungsergebnissen gerne direkt in weiteren Projekten einsetzen wollen. Auf Seiten der kommunalen Unternehmen hingegen wurde betont, dass lediglich das Demonstrationsgebäude für das Technologieprojekt zur Verfügung steht. Es stellte sich heraus, dass ein Generalunternehmen im Konsortium, welches im Sinne des Ergebnistransfers als Multiplikator dienen könnte, sinnvoll wäre. Die Mehrheit der befragten Unternehmen beteiligt die Mieter:Innen nicht an den Projekten, unterstützt aber bei der Kontaktaufnahme, falls Befragungen von den Forschungspartnern durchgeführt werden. Schwierigkeiten bereitet die hohe Mitarbeiterfluktuation in der Wissenschaft. Außerdem wurde angemerkt, dass Diskussionen mit den wissenschaftlichen Mitarbeiter:Innen zwar interessant, aber oft langwierig und praxisfern seien. Ein weiterer Kritikpunkt ist die eingeplante Zeit für die Bauphase, welche mehrheitlich als zu kurz angesehen wird.

In Summe legen die Ergebnisse nahe, dass es sinnvoll sein könnte, die Wohnungsunternehmen in der Konzeptphase nur beratend hinzuziehen und erst in der konkreten Planungs- und Bauphase vollumfänglich. In Bezug auf die formalen Projektanforderungen wären Vereinfachungen bei den Kostenabrechnungen sowie mehr Unterstützungs- und Beratungsangebote hilfreich.

Die detaillierten Vorschläge wurden nach der Erarbeitung in einer Diskussion im Rahmen eines Workshops mit den Interviewten validiert und angepasst. Zu diesem Workshop waren alle der interviewten Unternehmen eingeladen. Neben der Diskussion der Ergebnisse war auch die Vernetzung zwischen

den Zuwendungsempfänger:Innen Teil des Workshops. Das Format – durchgeführt als informelles digitales Treffen – wurde von den Teilnehmer:Innen positiv bewertet und soll zukünftig auch für Treffen mit Praxispartner:Innen aus anderen Branchen genutzt werden.

Die vollständigen Ergebnisse der Auswertung inklusive der Empfehlungen für Zuwendungsempfänger:Innen sowie Fördermittelgeber:Innen wurden verschriftlicht und dem Projektträger zur Verfügung gestellt. In einem Austauschtreffen zwischen dem Projektträger und Modul II wurden die Ergebnisse diskutiert.

Weiterhin wurde in AP 2 ein Konzept für eine Querauswertung zum Nutzer:Innenverhalten erarbeitet. Hierfür wurden alle dem Modul II zugeordneten Projekte, welche sich mit dem Einfluss des Nutzer:Innen-Verhaltens auf Energiekonzepte beschäftigen, anhand der Kurzbeschreibungen und bereits vorhandenen Ergebnisveröffentlichungen betrachtet. Die ursprüngliche Idee, Einflussfaktoren auf das Nutzer:Innen-Verhalten für Modellierungen aufzubereiten, hat sich als nicht umsetzbar herausgestellt. Neues Ziel der Auswertung war es, eine Übersicht über die aktuell im Forschungsbereich betrachteten Fragestellungen und Methoden zur Erforschung des Nutzer:Innen-Verhaltens in Gebäuden zu erstellen. Die Art und Weise, wie Nutzer:Innen mit der Gebäudetechnik interagieren, kann erhebliche Auswirkungen auf den Gesamtenergieverbrauch eines Gebäudes haben. Der Einfluss reicht von der individuellen Steuerung von Heiz- und Kühlsystemen über den Einsatz von elektronischen Geräten bis hin zur Akzeptanz spezifischer Technologien. Ein tiefgehendes Verständnis der Einflüsse ist von großer Bedeutung, um effektive Strategien zur Reduzierung des Energieverbrauchs in Gebäuden zu entwickeln. Die nachfolgend dargestellten Ergebnisse wurden veröffentlicht [24].

Die Analyse der ausgewerteten Projekte zeigt, dass unter dem Begriff Nutzer:Innen-Verhalten viele Verhaltensweisen zusammengefasst werden, von denen angenommen wird, dass sie einen Einfluss auf den Energieverbrauch des Gebäudes haben. Im Rahmen der Auswertung wurde das untersuchte Nutzer:Innen-Verhalten zunächst spezifiziert. Anschließend wurde festgestellt, welche Einflussfaktoren bzgl. dieses Verhaltens untersucht sowie welche Methoden dafür eingesetzt wurden. Grundsätzlich ist innerhalb der Projekte unter dem Begriff Nutzer:Innen-Verhalten das Energieverbrauchsverhalten zu verstehen, welches teilweise detaillierter beschrieben bzw. auf einen Bereich des Energiesystems bezogen wird. Zu diesen Verhaltensweisen gehören z. B.

- Heiz- und Kühlverhalten,
- Steuerung von Licht und Verschattung,
- Lüftungsverhalten, Fensterlüftung und
- Warmwassernutzung.

Eine mögliche Definition bzw. Metrik zur Quantifizierung des Nutzer:Innen-Verhaltens ist die Anzahl der Eingriffe über Raumbediengeräte zur Steuerung des Energiesystems. Die in den Projekten untersuchten Einflussfaktoren auf das Nutzer:Innen-Verhalten sind divers. Vereinfachend werden diese in sozioökonomische Faktoren und technische Faktoren kategorisiert. Methodisch gesehen wurde in vielen Projekten über die messtechnische Erfassung des Energieverbrauchs auf das Nutzer:Innen-Verhalten geschlossen. Teilweise wurde das Nutzer:Innen-Verhalten direkt über ein Monitoring erfasst. Daneben wurden auch Befragungen unter den Nutzenden durchgeführt. Proband:Innen-Versuche unter definierten, konstanten Laborbedingungen wurden nur sehr wenig durchgeführt.

○ *Sozioökonomische Einflussfaktoren – Merkmale der Nutzer:Innen*

In einigen Projekten wurde der Einfluss von Information auf das Nutzer:Innen-Verhalten untersucht. Dabei wurden z. B. generelle Informationen zu energiesparendem Verhalten gegeben. Teils ging es über das zur Verfügung stellen von Information hinaus und es wurden konkrete Verhaltensvorschläge gemacht bzw. die Nutzenden wurden zu einem bestimmten Verhalten aufgefordert.

Weiterhin wurde auch der Zusammenhang zwischen Partizipation der Nutzenden bei der Gebäudetransformation und deren Verhalten und Akzeptanz in Bezug auf die umgesetzten Maßnahmen untersucht. Es wurde auch der Einfluss der grundsätzlichen Einstellung der Nutzenden, z. B. zu Themen wie Nachhaltigkeit, berücksichtigt.

Außerdem wurden der mögliche Einfluss flexibler Raumnutzungskonzepte und heterogener Nutzer:Innen-Strukturen auf das Nutzer:Innen-Verhalten berücksichtigt.

- *Technische Einflussfaktoren – Gebäudemerkmale*

Zu den untersuchten Gebäudemerkmalen gehörte insbesondere der Einfluss der vorhandenen Gebäudetechniken auf das Verhalten der Nutzenden. Dazu wurde untersucht, welchen Einfluss die Ausstattung auf das Nutzer:Innen-Verhalten hat. Gebäudemerkmale, die im Vordergrund standen, waren Möglichkeiten zum aktiven Eingreifen. Zu diesem Punkt wurden auch verschiedene Betreibermodi, zeitabhängige Regelungen oder allgemein smarte Gebäudetechnik gezählt. Auf der passiven Seite gehört der Einsatz intelligenter Zähler dazu.

Das Nutzer:Innen-Verhalten hängt stark davon ab, inwieweit Nutzer:Innen die Auswirkungen ihres Handelns nachvollziehen können und bemerken. Ist die Einstellung gegenüber Themen wie Nachhaltigkeit und einer Verringerung des Energieverbrauchs positiv, werden Möglichkeiten zum Eingriff in das Energiesystem tendenziell mehr genutzt. Auch positive wirtschaftliche Auswirkungen tragen dazu bei, dass Nutzende aktiv ins Energiesystem eingreifen und Maßnahmen gegenüber offener sind. Ein weiterer wichtiger Punkt ist, dass die Möglichkeiten zum Eingriff einfach und verständlich durchzuführen sein müssen. Je komplexer das System, umso geringer ist die Interaktion. Klassische Eingriffsmöglichkeiten, wie z. B. die Nutzung von Jalousien, finden am meisten Anklang.

3.3 Arbeitspaket 3 (AP 3): Auswertung der F&E-Ergebnisse im Gebäudebereich

Die Analyse und Querauswertung der geförderten Projekte ist die zentrale Aufgabe der Wissenschaftlichen Begleitforschung. Neben verallgemeinerbaren Kennwerten (z. B. Begriffsdefinitionen und Benchmarkwerten für die Energieeffizienz im Wohn- und Nichtwohnbereich) geht es dabei um die eingesetzten Technologien beim Bau von und der Sanierung zu energieeffizienten Gebäuden. Projekte mit gleichartigen Schwerpunkten wurden als Vorbereitung für Querauswertungen, aber auch für den gezielten Austausch zwischen den Projektnehmer:Innen, geclustert, Indikatoren erarbeitet und Lessons Learned zusammengestellt. Ein Glossar für Begrifflichkeiten aus dem Bereich der energieeffizienten Gebäude soll die Verständigung zwischen den Forschungsprojekten aber auch in die Gesellschaft hinaus erleichtern.

Die Leitung des AP 3 erfolgte durch das Fraunhofer IBP. Das IBP entwickelte die Leitfäden für die Ermittlung der Einsparpotenziale der Forschungsvorhaben, das Glossar für Begrifflichkeiten aus dem Bereich energieeffiziente Gebäude und die Querauswertungen zu den Indikatoren und zu den Lessons Learned. Das detaillierte Projektcluster zur Übersicht von Projektinhalten und zur Identifikation von Projekten für Querauswertungen und thematische Veranstaltungen wurde vom IBP zusammen mit RWTH/EBC und ISI entwickelt und gepflegt. Die gebäudespezifischen Inhalte der beiden Fragebögen der Begleitforschung wurden ebenfalls vom IBP, unterstützt von RWTH/EBC und ISI, erarbeitet, umgesetzt und ausgewertet. Der Test der Leitfäden anhand vorliegender Forschungsprojekte erfolgte durch RWTH/EBC und IBP. Zusätzlich erstellte RWTH/EBC eine Querauswertung der Projekte zum Thema Lüftungsforschung.

Ziele des Arbeitspakets

- Zusammenstellung der wesentlichen F&E-Ergebnisse aus den seit 2015 bewilligten gebäudebezogenen Forschungsvorhaben der BMWK-Förderinitiativen
- Ermittlung der Grundlagen für die in AP 4.1 und AP 4.2 durchgeführten Potenzialbewertungen der Einspareffekte an Energie und klimaschädlichen Emissionen bei der Umsetzung von Forschungsvorhaben -> dieses Ziel wurde aufgrund mangelnder Daten in den Projektabschlussberichten und Fragebögenantworten geändert und stattdessen wurden Leitfäden für die Projektnehmer:Innen für die Ermittlung der Einspareffekte erarbeitet.

Methoden

- Entwicklung und Pflege eines detaillierten Projektclusters
- Entwicklung, Umsetzung und Auswertung von Fragebögen an die Projektnehmer:Innen
- Auswertung von Projektabschlussberichten
- Erarbeitung von Leitfäden für die Ermittlung von Einsparpotenzialen durch die Projektnehmer:Innen
- Weiterentwicklung eines Glossars für die Begrifflichkeiten aus dem Bereich energieeffiziente Gebäude
- Modulinterner und modulübergreifender Austausch zur Förderung einer gemeinsamen Basis für die Begleitforschung
- Nutzung von Ergebnissen früherer Begleitforschungen
- Veröffentlichung wissenschaftlicher Ergebnisse über die EWB-Website und die Webseite des Forschungsnetzwerks
- Zielgruppenorientierter Wissenstransfer durch Veranstaltungen wie Projekttreffen

Ergebnisse:

- Die Clusterung der Projekte war eine wichtige Grundlage zur Auswertung von Forschungsthemen, zur Identifikation von passenden Projekten zur Präsentation auf Veranstaltungen und zum Verständnis der vielfältigen Projekte im Förderbereich Gebäude.
- Die Übersicht über und die Auswertung der Projekte kann nicht allein über Fragebögen erreicht werden. Ein besseres Verständnis muss zusätzlich durch das Lesen und Auswerten der Abschlussberichte und teilweise durch Interviews mit den Projektnehmer:Innen geschehen. Das kann derzeit noch nicht komplett durch automatische Auswertungen oder KI erfolgen.
- Das Glossar ist hilfreich für ein gemeinsames Verständnis von Begrifflichkeiten oder zumindest für die Diskussion von unterschiedlichen Interpretationen
- Kennwerte für die Einsparpotenziale der Projekte im Bereich der Energie und der klimaschädlichen Emissionen sind derzeit in zu wenigen Abschlussberichten enthalten. Wenn es solche Kennwerte gibt, wurden sie unter unterschiedlichen Rahmenbedingungen ermittelt, die Grundlagen sind oftmals nicht ausreichend dokumentiert und die Kennwerte beinhalten meist nicht den gewünschten Umfang (z. B. Lebenszyklusbewertung und Skalierung).
- Die entwickelten Leitfäden können die Anzahl, Vergleichbarkeit und die Dokumentation dieser Kennwerte unterstützen, indem sie Rahmenbedingungen und die Art der Dokumentation vorgeben und auf unterstützende Dokumente verweisen. Die Umsetzung muss durch den PTJ durchgesetzt werden. Eine Weiterentwicklung der Leitfäden mit einer Anpassung an sich verändernde Bewertungsgrundlagen in den nächsten Jahren ist möglich.
- Einige spezielle Projekttypen der dem BF-Modul Gebäude zugeordneten Vorhaben machen die Ermittlung dieser Einsparpotenziale allerdings schwierig bis unmöglich.
- Mit der Indikatoranalyse werden der Stand und die Entwicklungen von Indikatoren im Gebäudebereich dargestellt, aber auch die Relevanz von einzelnen Indikatoren in Bezug auf Energieeffizienz und Klimaneutralität im Gebäudebereich aufgezeigt.
- Ziel der Indikatoranalyse war es, eine Grundlage für eine harmonisierte Anwendung der Indikatoren zu schaffen und damit die Vergleichbarkeit und die Reproduzierbarkeit zu erhöhen. Die Analyse zeigt jedoch, dass die identifizierten Indikatoren sehr vielfältig und in vielen Fällen nur bedingt miteinander vergleichbar sind, aufgrund von unterschiedlichen Grundlagen, Rahmenbedingungen, Bilanzgrenzen und teilweise den gewählten Bezugsgrößen. Der Rahmen der Ermittlung von Indikatorwerten wird in Forschungsberichten oft nicht transparent festgehalten und grenzt den Interpretationsspielraum nicht genug ein.
- Die gesammelten Lernerfahrungen stellen eine Mischung dar aus konkreten Verbesserungsmöglichkeiten, Bewertungen und Wünschen für Erleichterungen bei der Forschungsarbeit. Sie können dazu

dienen, zukünftige Forschungsprojekte effizienter zu gestalten sowie Handlungs- und Forschungsbedarf abzuleiten.

3.3.1 Projektcluster

Die im Bereich Energiewendebauen geförderten Projekte wurden seitens PtJ auf Basis der Leistungsplansystematik innerhalb Projektlisten zu den jeweiligen Modulen zugeordnet. Um einen Überblick über die Inhalte und Schwerpunkte der dem Modul II zugeordneten Projekte zu erhalten, wurde ein Projektcluster in Form einer detaillierten Exceltabelle angelegt. Im Projektcluster wurden die Forschungsprojekte gesammelt und anhand der Forschungsschwerpunkte und behandelten Thematiken kategorisiert. Die Grundlage für die Kategorisierung stellten textliche Beschreibungen auf der EnArgus Projektdatenbank, auf der ehemaligen EWB-Webseite sowie auf den jeweiligen Projekt-Homepages und in Veröffentlichungen dar. Die dem Modul II zugewiesenen Projekte waren sehr vielfältig. Um gleichartige Projekte zu identifizieren, wurden sie zunächst in Projekttypen eingeteilt. Es wurde zwischen drei Projekttypen unterschieden: Demonstrationsgebäude-Projekte, Technologie-Projekte und sonstige Projekte. Bei den Technologie-Projekten erfolgte eine weitere Differenzierung in bauliche Technologien, anlagentechnische Technologien und multifunktionale Bauelemente, die sowohl bauliche als auch anlagentechnische Komponenten beinhalten. Unter „sonstige Projekte“ wurden Projekte geführt, die kein Demonstrationsgebäude- bzw. kein Technologie-Projekt waren und ihren Fokus z. B. auf der Entwicklung von Bewertungsmethoden, Software oder Algorithmen im Gebäudebereich hatten. Abbildung 3 zeigt eine beispielhafte Auswertung zum Projekttyp mit Stand Ende 2024 von aktuellen und kürzlich (vor weniger als einem Jahr) ausgelaufenen Projekten.

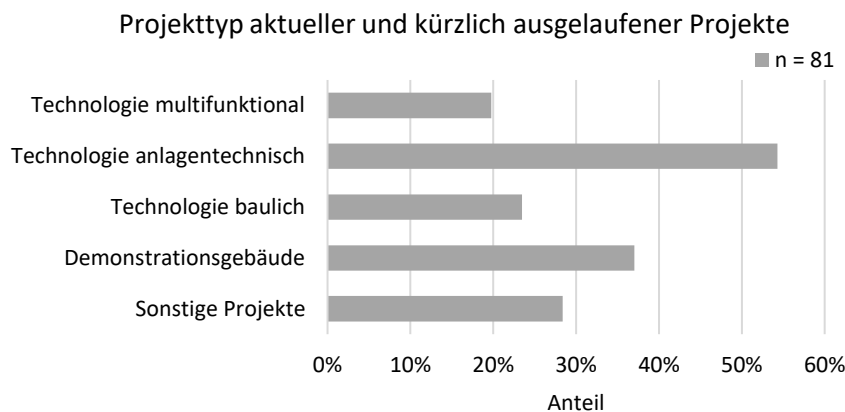


Abbildung 3: Verteilung der dem Modul II zugeordneten Vorhaben auf unterschiedliche Projekttypen. Dabei wurden aktuelle Projekte und Projekte, die seit weniger als einem Jahr ausgelaufen sind, zum Zeitpunkt Ende 2024 betrachtet.

Um weiterführende Informationen zu den einzelnen Projekten festzuhalten, wurde das Cluster in 17 Themenbereiche mit ca. 72 Kriterien (Unterkategorien) untergliedert. Die Themenbereiche wurden entsprechend den geplanten Auswertungen festgelegt und umfassten Bereiche wie Art des Projektes, Gebäudezustand, Bautechnik/Gebäudehülle, Anlagentechnik, Energie, Eigenstromnutzung, Sektorkopplung, Betrieb/Regelung/Steuerung, Netzdienlichkeit, Kostenreduktion, Energie-/Treibhausgas-Bilanz, Nachhaltigkeit, regulatorische Rahmenbedingungen, Akzeptanz/Partizipation, Lessons Learned, Planungshilfsmittel und Marktpotential.

Im Projektcluster wurden zusätzlich zum Projektakronym das Förderkennzeichen und das Projektlaufzeitende zur Einordnung der Aktualität des Projektes festgehalten. Es wurden eine Arbeits- und eine Übersichtsversion geführt. In der Arbeitsversion wurden die Informationen detailliert erfasst, während

sie in der Übersichtsversion auf die wesentlichen Punkte zusammengefasst wurden. Einen Ausschnitt aus dem Projektcluster zeigt Abbildung 4.

Informationen allgemein				Projekttyp					Gebäude allgemein					
Nr.	Förderkennzeichen	Kennwort	Projekt-Laufzeitende	EnArgus-Link	Demo-gebäude	Technologie			Sonstiges	Einzelgebäude/ Gebäude im Quartier	Neubau	Sanierung	Bestands- erweiterung	Bestand/ Bestands- analyse
						Baulich	Anlagen- technisch	Multi- funktional						
1	0325865	SpeedCall2	31.07.2020	https://www	-	-	X	-	-	-	-	-	-	-
2	0325866	SolSpaces 2.0	31.01.2021	https://www	-	-	X	-	-	Einzelgebäude	-	-	-	-
3	03EG80001	EG2050: FlexGebler	31.01.2022	https://www	-	-	X	-	-	-	-	-	-	X
4	03EG80004	EG2050: EMGIMO	30.09.2020	https://www	-	-	X	-	-	Einzelgebäude	-	X	-	-
5	03EG80005	EG2050: VID1	30.08.2021	https://www	-	X	-	-	-	Einzelgebäude	X	X	-	-
6	03EG80007	EG2050: SanBest	31.12.2021	https://www	X	-	-	-	-	Einzelgebäude	-	X	-	X
7	03EG80008	EG2050: RakaDaMi	30.06.2020	https://www	-	X	-	-	-	Einzelgebäude	-	-	-	-
8	03EG80009	EG2050: Inno-NEX	30.06.2020	https://www	-	-	X	-	-	Quartier	-	-	-	-
9	03EG80010	EG2050: LLEC-Verwaltungsbau	31.12.2022	https://www	X	-	-	X	-	Einzelgebäude	X	-	-	-
10	03EG80011	EG2050: Campo_V	28.02.2021 / 31.08.2021	https://www	X	-	-	-	-	Einzelgebäude	X	-	-	-
11	03EG80012	EG2050: EITecSamadm	30.06.2023	https://www	X	-	X	X	-	Einzelgebäude	-	-	-	X
12	03EG80013	EG2050: FM4Practice	31.07.2021	https://www	-	-	-	-	X	Einzelgebäude	X	-	-	-
13	03EG80015	EG2050: MFH Mähringen	31.07.2023	https://www	X	-	-	-	-	Einzelgebäude	X	-	-	-
14	03EG80017	EG2050: CoSo	31.05.2022	https://www	-	-	-	-	X	Einzelgebäude	-	X	-	X
15	03EG80018	EG2050: HoFiAd	31.12.2022	https://www	-	-	X	-	-	Einzelgebäude	-	-	-	-
16	03EG80020	EG2050: ETK	31.12.2023	https://www	X	-	-	X	-	Einzelgebäude	-	-	-	X
17	03EG80021	EG2050: FFS-VIG	31.12.2022	https://www	X	X	-	-	-	Einzelgebäude	X	-	-	-

Abbildung 4: Ausschnitt aus der Übersichtsversion des Projektclusters.

Das Projektcluster wurde kontinuierlich um neu gestartete Projekte, die dem Modul II zugeordnet waren, erweitert und mit öffentlich zugänglichen Informationen aktualisiert. Zudem wurden die Informationen bezüglich des Projektendes und der Verfügbarkeit der Abschlussberichte fortlaufend auf den neuesten Stand gebracht. Mithilfe der Ergebnisse aus mehreren Befragungen wurden die Informationen des Projektclusters validiert und weiter verdichtet.

Das Projektcluster stellte ein zentrales Element für verschiedene Aktivitäten innerhalb der Arbeit der Begleitforschung dar. Mit Hilfe des Projektclusters konnten gleichartige Projekte bzw. Projekte mit bestimmten Themen identifiziert und zusammengefasst werden. Es bildete somit die Basis für:

- Eine Übersicht über Forschungsaktivitäten im Bereich EWB-Gebäude, die es ermöglicht, zentrale Themen oder Fragestellungen zu identifizieren. Die Übersicht erlaubt es zudem, Forschungsbedarfe abzuleiten, das heißt Themenbereiche, die z. B. noch nicht ausreichend erforscht sind und weiterer Untersuchung bedürfen.
- Die Identifizierung von Projekten, die den Fokus auf das gleiche Thema legen, für die Durchführung von Querauswertungen.
- Die Auswahl geeigneter und thematisch passender Projekte unter anderem für Fokustreffen, Austauschformate und für Veranstaltungen.
- Die individuelle und gezielte Ansprache, beispielsweise bei Kurzinterviews, schriftlichen Befragungen oder Kurzfragebögen.

Das Projektcluster wurde am Ende der Projektlaufzeit zur weiteren Verwendung an PTJ übergeben.

3.3.2 Fragebögen der Begleitforschung

Im Rahmen der Begleitforschung wurden insgesamt drei verschiedene Befragungen der Forschungsprojekte durchgeführt: eine modulübergreifende Befragung im Jahr 2021, eine Expertenbefragung im Jahr 2022 und eine modulinterne Befragung (MII-Cluster-Fragebogen) im Jahr 2023. Es wurde darauf

geachtet, dass zwischen den einzelnen Befragungen genügend Zeitabstand eingehalten wurde, um die laufenden Projekte nicht zu überfordern und den neu gestarteten Projekten ausreichend Zeit für die Entwicklung ihrer Konzepte zu geben.

Die erste Befragung wurde modulübergreifend im Jahr 2021 für die gesamte Forschungslandschaft erarbeitet. Die Erstellung des Fragebogens und die Durchführung der Befragung wurden vom BF-Modul I/V koordiniert und von Kolleg:Innen aus den anderen Modulen intensiv unterstützt. Der Fragebogen setzte sich aus Fragen zusammen, die von den Modulen entsprechend ihrer eigenen Themenbereiche beigetragen wurden. Es wurden unterschiedliche Antworttypen wie Einfachauswahl, Mehrfachauswahl, Textfeld, Zahlenfeld mit Vorgabe der Einheit sowie teilweise Kombinationen davon verwendet und, wo möglich, eine Antwortauswahl vorgegeben. Alle Fragen wurden themenspezifisch kategorisiert. Mit Hilfe entsprechender Regeln, Verknüpfungen und einleitender Fragestellungen wurde gewährleistet, dass die Projektleitungen nur die für ihr Projekt zutreffenden Fragen gestellt bekommen. Als Arbeitshilfe wurde von BF-Modul II ein detailliertes Flussdiagramm zur Übersicht der Verknüpfungen der eigenen Fragestellungen erarbeitet. Die korrekte Umsetzung wurde anhand von mehreren PreTest-Runden mit Projekten aus dem Bereich der BF-Modul-Partner überprüft. Zu diesem Zweck wurden unterschiedliche Projekttypen ausgewählt. Zur Motivation wurde der umfangreiche Fragebogen auf einer Informationsveranstaltung den Zuwendungsempfänger:Innen erläutert und die Ziele, die mit dem Fragebogen verfolgt werden, vorgestellt. Des Weiteren stand das BF-Modul II-Team, ebenso wie andere BF-Module, im Rahmen des Support-Tages den Zuwendungsempfänger:Innen persönlich bei Fragen zum Fragebogen zur Verfügung. Grundsätzlich lässt sich feststellen, dass die Bereitschaft zum Ausfüllen des Fragebogens seitens der Projekte moderat ausfällt. Der Fragebogen wurde von 53 % (entspricht 87 Projekten) der dem BF-Modul II zugeordneten Projekte in allen Themenbereichen ausgefüllt. Abbildung 5 zeigt die Themenbereiche, zu denen seitens BF-Modul II Fragen gestellt wurden, sowie die Anzahl der Projekte, die in dem jeweiligen Bereich Fragen beantwortet haben. Die themenleitenden Eingangsfragen wurden häufig (zu ca. 70 %) beantwortet. Die auf die Eingangsfragen folgenden themenvertiefenden Fragen wurden dagegen etwas weniger häufig beantwortet. Fragen, welche eine Eingabe quantitativer Werte erforderten, wurden am wenigsten beantwortet.

Anzahl der Projekte, die die Themenblöcken beantwortet haben

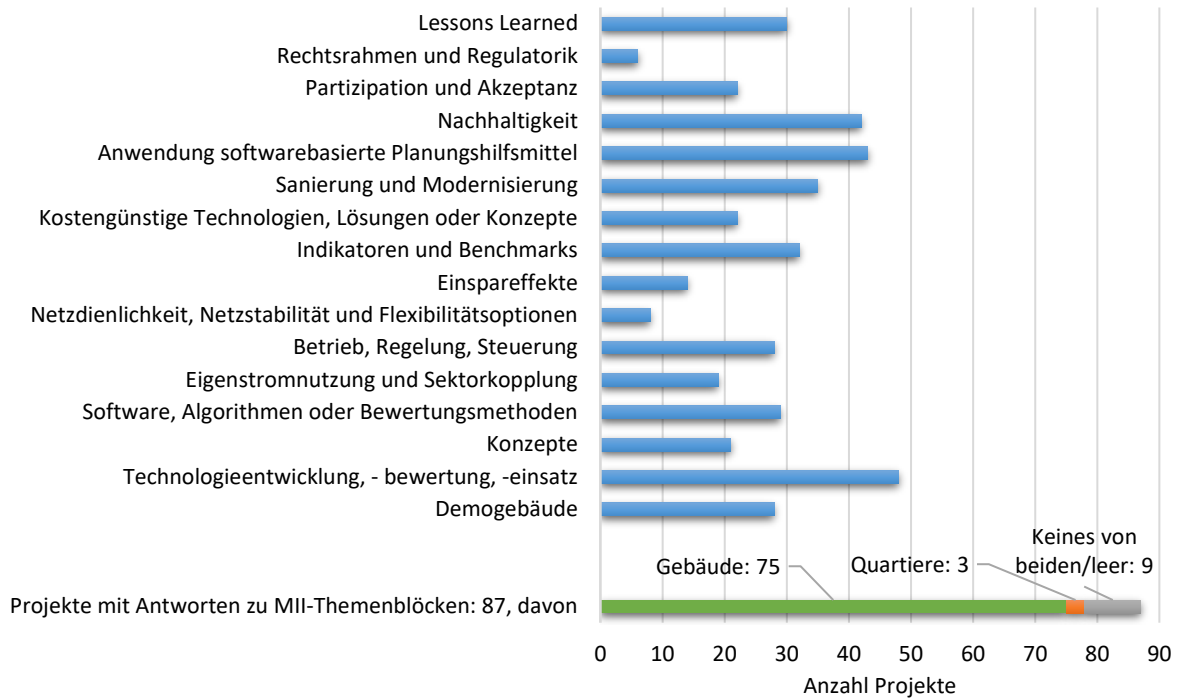


Abbildung 5: Anzahl der dem BF-Modul II zugeordneten Projekte, die den jeweiligen Themenblock beantwortet haben. An der modulübergreifenden Befragung im Jahr 2021 nahmen von insgesamt 164 dem BF-Modul II zugeordneten Projekte 53 % der Projekte teil. Bei 75 Projekten handelte es sich um Gebäudeprojekte, bei drei um Quartiersprojekte und bei neun weder um ein Gebäude- noch um ein Quartiersprojekt.

Im Frühjahr 2023 wurde seitens BF-Modul II ein modulspezifischer Fragebogen, der so genannte MII-Cluster-Fragebogen, erstellt. Der MII-Cluster-Fragebogen stellte eine überarbeitete und deutlich gekürzte Version der modulübergreifenden Befragung aus dem Jahr 2021 dar. Dabei wurden Fragen aus dem Gebäudebereich des früheren Fragebogens übernommen, diese wurden aber hinsichtlich des weiteren Abfragebedarfs geprüft, bearbeitet, gekürzt und teilweise neugestaltet. Der MII-Cluster-Fragebogen wurde mit Fragen vom BF-Modul IV Digitalisierung und vom BF-Modul I Monitoring ergänzt. In ähnlicher Weise wie bei der modulübergreifenden Befragung wurde mit Eingangsfragen gearbeitet, die entweder als Leitfragen in die Themenpfade mit themenspezifischen Fragen einführen oder bei nicht zutreffen die themenvertiefenden Fragen umgehen. Abbildung 6 zeigt die Gliederung und die abgefragten Themenbereiche des MII-Cluster-Fragebogens.

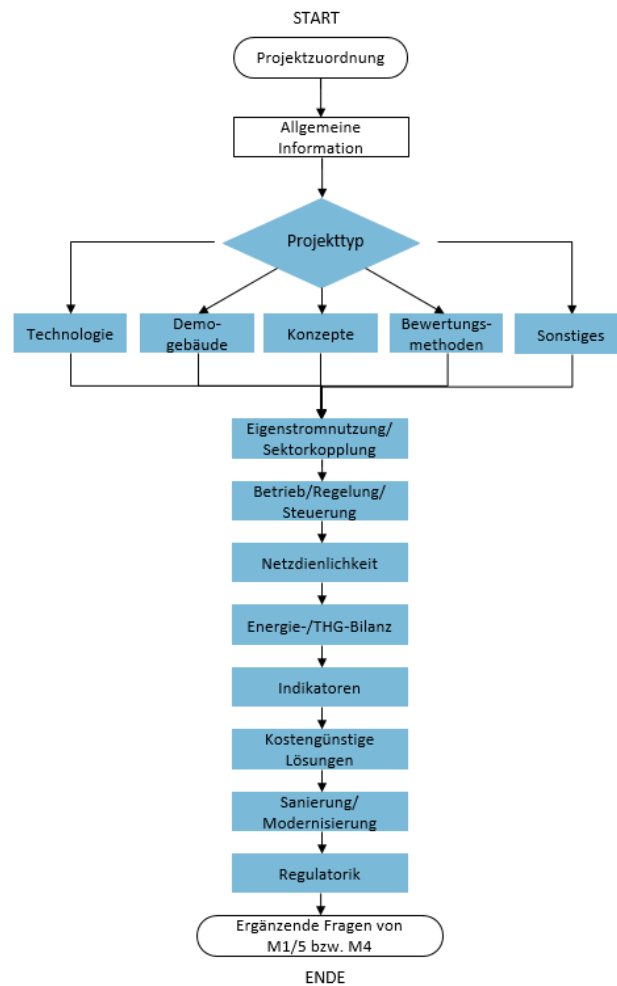


Abbildung 6: Aufbau des MII-Cluster-Fragebogens mit der Reihenfolge der abgefragten Themenbereiche.

Der Fragebogen wurde nur an neu in die Begleitforschung und in BF-Modul II aufgenommene Projekte gesendet sowie an die zu BF-Modul II-zugeordneten Projekte, die den ersten Fragebogen nicht beantwortet haben, um auch deren Informationen in die Datenstruktur der Begleitforschung einpflegen zu können. Je nach Art des Projekts betrug die benötigte Zeit zur Bearbeitung des Fragebogens 30 bis 45 Minuten. Die Rücklaufquote des MII-Cluster-Fragebogens lag bei 49 %. Der Fragebogen wurde von den Projekten als übersichtlich und gut strukturiert bewertet. Durch die Strukturierung des Fragebogens mit Eingangsfragen, die nur bei Bejahung zu weiterführenden Fragen geführt haben, wurden die Fragen gut angenommen und beantwortet. Auf eine Erhebung quantitativer Angaben wurde in dem MII-Cluster-Fragebogen, ausgehend von der Erfahrung aus dem ersten Fragebogen, weitestgehend verzichtet. Die Ergebnisse der Befragung wurden dazu genutzt, die neuen dem BF-Modul II zugeordneten Projekte thematisch zu kategorisieren (siehe Projektcluster) sowie das bereits erarbeitete Projektcluster abzugleichen und zu erweitern. Außerdem ermöglichten es die Fragebogenergebnisse Projekte zielgerichtet zu bestimmten Themen sowie geplanten Veranstaltungen und Austauschformaten anzusprechen und stellten ergänzend zu dem Projektcluster detailliertere Informationen dar, die zur Durchführung von verschiedenen Querauswertungen wie beispielsweise zu innovativen Technologien und smartem Gebäudebetrieb genutzt wurden. Des Weiteren wurden die Auswertungen der Ergebnisse auf Veranstaltungen der BF verwendet und bieten eine Übersicht über die Forschungsaktivitäten im Bereich EWB-Gebäude.

In einem weiteren, vom BF-Modul Quartiere initiierten, Fragebogen wurden Expert:Innen-Meinungen der Projektleiter:Innen sowie Projekterkenntnisse abgefragt. Die so genannte Expert:Innen-Befragung

wurde von allen Modulen der Begleitforschung erarbeitet. Das Ziel von BF-Modul II war es, mit Hilfe dieser Befragung eine Übersicht über die Forschungsfelder der Vorhaben zu erhalten, Erkenntnisse und Handlungsempfehlungen aus den Vorhaben abzuleiten sowie für die geplanten Querauswertungen Lessons Learned und Hemmnisse zu identifizieren. Das BF-Modul II beteiligte sich an diesem Fragebogen in folgenden Themenfeldern (siehe Abbildung 7): Forschungsziele der Projekte, Empfehlungen an die Politik, Forschungslücken, Lernerfahrungen und Hemmnisse. Erstmals wurde dieser Fragebogen an alle Teilprojekte und nicht nur an die Projektleitungen versendet.

Forschungsziele	Empfehlungen an die Politik	Forschungslücken	Lernerfahrungen	Hemmnisse
Welche Forschungsfragen wollen Sie in Ihren Projekten beantworten?	Welche Empfehlungen können Sie durch die Bearbeitung des Projekts bzw. der Projekte an die Politik ausgeben?	Haben Sie im Rahmen Ihres Projektes bzw. Ihrer Projekte Forschungslücken entdeckt, die zukünftig im Rahmen von Forschungsprojekten mehr gefördert werden sollten?	Was sind bisher Ihre zentralen Erkenntnisse bzw. welche Lernerfahrungen (Lessons Learned) haben Sie in Ihrem Projekt bzw. in Ihren Projekten gemacht?	In welchem Bereich sehen Sie Hemmnisse zur Durchsetzung Ihrer Forschungs-idee/n (Konzept, Technologie usw.) in der Praxis?

Abbildung 7: Themenfelder und die gestellten Fragen seitens BF-Modul II im Rahmen der Expert:Innen-Befragung.

Die Ergebnisse im Bereich der Forschungsziele zeigten, dass die Mehrheit der Projekte, die den Fragebogen beantworteten, Themen zu Wärmenetzen erforscht. Im Fokus der bestehenden Wärmenetze stehen insbesondere die Themen wie Transformation, Monitoring, Betriebsoptimierung, Instandhaltung/Sanierung und Dekarbonisierung. In Zusammenhang mit allen Arten der Wärmenetze werden Fragestellungen zur Sektorkopplung, Flexibilisierung und zur Integration verschiedener Energieerzeuger, insbesondere Großflächenkollektoren, Erdwärmekollektoren und Großwärmepumpen, behandelt. Auch kalte Wärmenetze rücken zunehmend in den Forschungsfokus. Weitere Ansätze beschäftigen sich mit Betrieb, Regelung und Steuerung, wobei Methoden und Regelungskonzepte sowie Betriebsoptimierung unter anderem durch intelligent lernende Systeme untersucht werden. Eine große Anzahl von Projekten hat sich Forschungsziele im Bereich der Gebäudetechnik gesetzt. Insbesondere werden die Effizienzsteigerung von RLT-Anlagen und Trinkwarmwassersystemen, eine (automatisierte) Betriebsoptimierung sowie die Entwicklung und Untersuchung innovativer Technologien angegangen. Weitere Forschungsziele umfassen die Konzeptentwicklung für Gebäude, Quartiere und Städte, die thermische Verbesserung der Gebäudehülle und den Einsatz erneuerbarer Energien.

Bei den Empfehlungen an die Politik betrafen die häufigsten Forderungen eine beschleunigte Planung sowie eine Lockerung und Abschwächung der Anforderungen im Datenschutzrecht, bei Genehmigungsverfahren unter anderem im Bereich Grundwasserschutz und Regularien zur oberflächennahen Geothermie. Zudem wurden Vereinfachungen von Förderrichtlinien, Beauftragungen und Rahmenbedingungen für Förderprojekte, Regulatorik für Quartiersprojekte und allgemein Regelungen im Bauwesen gefordert. Zur Durchdringung erneuerbarer Energien im Markt wurde eine verstärkte wirtschaftliche und technische Förderung gefordert. Als wesentliche Voraussetzung für den Erfolg von Forschungsprojekten und der Transformation des Gebäudeenergiebereichs nannten die Projekte eine umfassende Digitalisierung, die von der Politik stärker gefördert werden sollte. Zudem sollte offen an verschiedenen Technologien geforscht und nicht auf einzelne Technologien fokussiert werden. Weitere Forderungen umfassten einen verstärkten Wissenstransfer in die Praxis, die Schaffung von Planungssicherheit durch langfristige regulatorische Rahmenbedingungen sowie eine bessere personelle und fachliche Ausstattung der Behörden.

Im Bereich der Forschungslücken betrafen die häufigsten Nennungen den Bereich der Digitalisierung, wobei die gesamte Kette, vom systematischen Erheben über die Datenhaltung bis zur Bereitstellung von Daten genannt wurde. Laut den Projekten besteht Forschungsbedarf in der Standardisierung von Prozessen und Schnittstellen zur Vernetzung des Datenflusses. Weiterer Forschungsbedarf wird in der Automatisierung von Prozessen, wie der Objekterkennung oder Plausibilitätsprüfung, gesehen. Im Bereich der Messtechnik liegen Forschungslücken in der Weiterentwicklung vorhandener Technologien, wie drahtloser Sensorik mit Energy Harvesting. Nach der Digitalisierung sehen die Projekte den Praxis-transfer als weitere wichtige Forschungslücke. Deswegen wird für das Gelingen der Energiewende mehr Kooperation mit Praxispartner:Innen in den Forschungsprojekten gefordert. Auch die Entwicklung praxistauglicher Planungstools, Energiemanagementkonzepte und Montagekonzepte wird als Forschungslücke genannt. Aus dem Bereich Lebenszyklusanalyse als Bewertungsmethode wird als Forschungslücke die Berücksichtigung grauer Emissionen zur Ermittlung und Beurteilung von gesamten Emissionen eines Gebäudes identifiziert. Insbesondere in der Bilanzierung von Gebäudetechnik und der zugehörigen Software bestehen noch Lücken. Weiterhin wird die Entwicklung standardisierter Bewertungsmethoden zur Ökobilanzierung mit einer quantitativen Datenbasis als notwendig erachtet. Zusätzlich wurden Forschungslücken in weiteren Bereichen wie Wärmenetze, Betriebsoptimierung sowie Kommunikation und Nutzer:Innen-Interaktion genannt.

Die im Rahmen der Expert:Innen-Befragung erhobenen Lernerfahrungen (Lessons Learned) wurden in der Querauswertung zu Lessons Learned aus den Projekten der Forschungsinitiative EWB analysiert (siehe Abschnitt 3.3.5). Die Verwertung der Rückmeldungen zu den Hemmnissen fand in AP 5) „Betrachtungen regulatorischer Rahmenbedingungen“ statt.

Die geringe Rücklaufquote des modulübergreifenden Expert:Innen-Fragebogens zeigte, dass auch bei einfachen Multiple-Choice Fragen die Motivation zur Fragebogenbeantwortung herausfordernd ist. Die Projektansprache zur Vermittlung des Befragungshintergrunds und die Formulierung für alle Fachbereiche verständlicher Fragen ist wichtig. Ein projektübergreifender Fragebogen, der an alle Projekte gerichtet ist, eignet sich nicht zur Erhebung quantitativer Angaben. Stattdessen sollten Fokusbefragungen ausgewählter Projekte priorisiert werden, da sie eine höhere Rücklaufquote erzielen als die Abfrage in einem allgemeinen Fragebogen. Persönlicher Austausch (z. B. per E-Mail oder Telefon) sowie individuelle Interviews mit den Projekten wurden gut angenommen und führten bei vielen Informationen zu besseren Ergebnissen.

3.3.3 Glossar für Begrifflichkeiten aus dem Bereich Energieeffizienter Gebäude

Es wurde ein Glossar für den Bereich „energieeffiziente Gebäude“ erstellt, um die Begrifflichkeiten und deren Verwendung in diesem Kontext zu vereinheitlichen. Dieses Glossar umfasst insgesamt 338 Begriffe und wurde in zwei Phasen entwickelt. In der ersten Phase diente das bereits vorhandene EWB-Glossar der früheren BF als Grundlage. Dieses wurde mit relevanten Begriffen aus zwei weiteren Quellen ergänzt. Die aus diesen drei Quellen übernommenen Bedeutungserklärungen wurden überprüft und falls erforderlich überarbeitet. Zudem sammelte die Begleitforschung während der durchgeführten Arbeiten weitere relevante Begriffe für den Gebäudebereich. In der zweiten Phase wurde das Glossar um zusätzliche, für den Bereich „Gebäude“ relevante, Begriffe erweitert. Bereits vorhandene Erläuterungen wurden, wenn nötig, aktualisiert. Die finale Version des Glossars wurde als PDF-Bericht Anfang 2024 auf der Webseite „Energieforschung“ [26] des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz veröffentlicht. Um die Übersicht über die 338 im Dokument enthaltenen Begriffe zu verbessern, wurden verwandte Begriffe hervorgehoben und untereinander verlinkt. Dies ermöglicht es, sich über zusammenhängende Begrifflichkeiten zu informieren und verdeutlicht Gemeinsamkeiten sowie Unterschiede bei ähnlichen Begriffen. Die Inhalte des Glossars wurden außerdem in das Glossar der Forschungsnetzwerke übertragen.

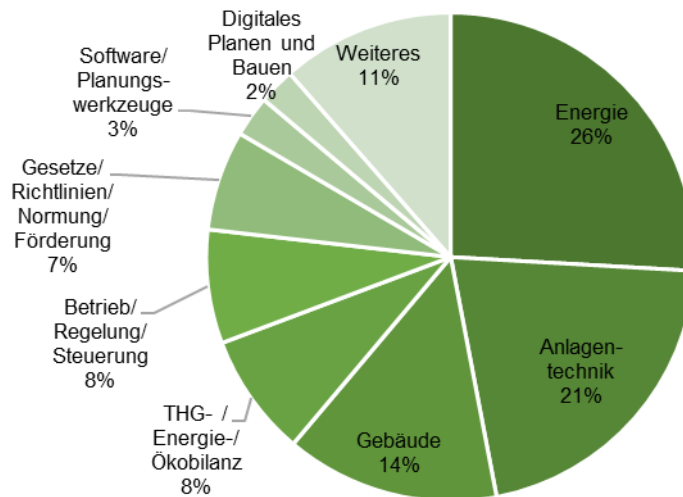


Abbildung 8: Übersicht über die Themenbereiche, die von Begrifflichkeiten des Energiewendebauen-Glossars abgedeckt werden. Quelle: eigene Darstellung.

Abbildung 8 zeigt eine vereinfachte Übersicht über die Themenbereiche, die durch die gesammelten Begrifflichkeiten abgedeckt wurden. Knapp ein Drittel der Begriffe kommt aus dem Bereich „Energie“ und beinhaltet Termini zu Energiequellen und -trägern, zu den benötigten Energiemengen, zu definierten Energiekennwerten sowie zur Energieversorgung. Etwas mehr als ein Fünftel der Begriffe deckt den Themenbereich „Anlagentechnik“ ab, wobei im Wesentlichen Termini zu technischen Systemen in Gebäuden wie Heizungs-, Kühlungs-, Lüftungs-, Trinkwarmwasser- und Speichersystemen sowie Wärme- und Kälteübergabesystemen definiert wurden. Der Themenbereich „Gebäude“ stellt ebenfalls einen häufig vertretenen Bereich dar. Dieser beinhaltet Erläuterungen zu Gebäudekenngrößen, zu einzelnen Komponenten der Gebäudehülle sowie zu Anforderungen, die an die Gebäudehülle und an das Raumklima gestellt werden. Um Inhalte aus Gesetzen und Vorschriften auf dem aktuellen Stand zu halten, sollte das Glossar vor allem im Bereich der rechtlichen und normativen Rahmenbedingungen regelmäßig aktualisiert werden. Zusätzlich könnten neue technologische, aber auch markttechnische Entwicklungen sowie neu etablierte Fachbegriffe aufgenommen werden.

3.3.4 Querauswertung zu Indikatoren

Anhand einer Indikatoranalyse wurde eine Übersicht über die im Gebäudebereich angewendeten Indikatoren geschaffen und diese mit den Angaben der Indikatorwerte bzw. der Bildung von Indikatorwertebereichen (als erster Schritt in Richtung von Benchmarks) ergänzt. Als ein Indikator wurde „ein Merkmal, welches als Vergleich für einen Zustand bzw. für eine bestimmte Entwicklung herangezogen wird“ [27] definiert. Die Indikatoren im Gebäudebereich, die Merkmale eines Gebäudes wiedergeben, wurden als gebäudespezifische Indikatoren bezeichnet, während die Indikatoren, die Merkmale einer Technologie beschreiben, als sogenannte technologiespezifische Indikatoren zusammengefasst wurden. Die Identifizierung von Forschungsvorhaben mit potenziellen Indikatoren und Indikatorwerten erfolgte in zwei Schritten. Als Datengrundlage wurde die Informationen aus zwei Befragungen (modulübergreifende Befragung im Jahr 2021, MII-Cluster-Fragebogen im Jahr 2023) verwendet. Etwa die Hälfte der Forschungsprojekte, die an der Befragung teilgenommen haben, waren zum Zeitpunkt der Auswertung abgeschlossen und verfügten über einen Abschlussbericht. Angaben dieser Projekte konnten somit durch Sichtung von vorliegenden Abschlussberichten verifiziert und ergänzt werden. Die Vervollständigung der anderen Hälfte der Angaben wurde durch schriftliche Anfragen erreicht. Ergänzend zu den identifizierten Forschungsprojekten aus der Befragung wurden durch die Begleitforschung weitere Abschlussberichte von Forschungsprojekten ausgewertet, die nicht an der Befragung teilgenommen hatten. Auf diese Weise konnten insgesamt 112 Indikatoren identifiziert und 96 davon mit Indikatorwerten ergänzt werden.

Als Ergebnis wurden die Indikatoren einschließlich der Indikatorkennwerte in zwei Indikatorlisten für gebäudespezifische und technologiespezifische Indikatoren zusammengetragen. Die gebäudespezifischen Indikatoren wurden in die Kategorien Umwelt, Wirtschaftlichkeit, thermische Qualität der Gebäudehülle, Raumklima und Gebäudegeometrie eingeteilt. Die Liste der technologiespezifischen Indikatoren enthält die Kategorien Anlagensysteme, Bau- und Dämmstoffe und transparente und opake Fassadenbauteile. Die Gestaltung der Indikatorlisten zeigt der Ausschnitt in Abbildung 9.

Indikator	Anzahl Kennwerte	Kennwert/Kennwertebereich	Kennzeichen
Emissionen			
Betriebsbedingte THG-Emissionen	4 1 1 4 3	WG (mit PV-Strom): 10 – 25 kg CO _{2,äq} /(m ² ·a) WG (ohne PV-Strom): 39 – 44 kg CO _{2,äq} /(m ² ·a) WG (Bestand): 33 kg CO _{2,äq} /(m ² ·a) NWG: 9,1 – 11 kg CO _{2,äq} /(m ² ·a) Einsparpotential: WG: 27 – 65 %	G/Em – 1
»Graue« Emissionen	3 1 1 1	NWG: 224 – 840 kg CO _{2,äq} /m ² bzw. NWG: 4,5 – 17 kg CO _{2,äq} /(m ² ·a) Einsparung durch Erhalt Rohbau: WG: 7,0 kg CO _{2,äq} /(m ² ·a) Anteil an Gesamt-THG-Emissionen: WG: ca. 42 % NWG: ca. 50 %	G/Em – 2
Gesamte THG-Emissionen	1	WG: 22 kg CO _{2,äq} /m ²	G/Em – 3
Energiebedarf/-verbrauch			
Bedarf			
Primärenergiebedarf	3 2	WG: 8,4 – 23 kWh/(m ² ·a) NWG: 50 – 116 kWh/(m ² ·a)	G/Eb – 1
Endenergiebedarf – gesamt	15 2 1	WG: 15 – 71 kWh/(m ² ·a) WG (Bestand): 144 – 205 kWh/(m ² ·a) NWG: 15 kWh/(m ² ·a)	G/Eb – 2
Endenergiebedarf – Heizung	1 3 1	WG: 5,2 kWh/(m ² ·a) NWG: 41 – 76 kWh/(m ² ·a) NWG (Bestand): 202 kWh/(m ² ·a)	G/Eb – 3
Endenergiebedarf – Warmwasser	1 ?	WG: 7,7 kWh/(m ² ·a) Anteil am Endenergiebedarf Wärme: 30 – 50 %	G/Eb – 4

Abbildung 9: Gestaltung der Indikatorlisten am Beispiel eines Ausschnitts (hier Emissionen und Energiebedarf).

Da die Indikatorwerte teilweise sehr speziell sind und nur für bestimmte Randbedingungen gelten bzw. unter bestimmten Voraussetzungen ermittelt wurden, wurde ergänzend zu den Indikatorlisten für 96 gelistete Indikatoren ein sogenannter Indikator-Steckbrief erstellt. Der Indikator-Steckbrief, dargestellt in Abbildung 10, stellt auf einer Seite die entscheidenden Informationen zum jeweiligen Indikator bereit.



Indikator: Nutzerstrombedarf		G/Eb - 10
Kurze Beschreibung und Einheit des Indikators		
Der Nutzerstrom umfasst den Strombedarf, der durch den Nutzer verursacht wird. Er wird im Rahmen der derzeitigen Berechnungsvorschriften für den Energiebedarf von Gebäuden (DIN V 18599) für einen öffentlich-rechtlichen Nachweis nicht ermittelt oder berücksichtigt. Der Nutzerstrom fällt somit zusätzlich zum Strombedarf an, der zur Versorgung des Gebäudes mit Energie (Heizung, Trinkwarmwasser, Lüftung, Kühlung und bei Nichtwohngebäuden zusätzlich Beleuchtung) benötigt wird. Der Nutzerstrom umfasst bei einem Wohngebäude den Stromverbrauch für Beleuchtung und elektronische Haushalts- und Kommunikationsgeräte, während er bei einem Nichtwohngebäude den Stromverbrauch für technische Ausstattung (bspw. Computer, Drucker, usw.), Informationstechnologie (Telefon, Netzwerke, usw.), Geräte in Gemeinschaftsbereichen (z. B. Aufzüge), Prozesswärme, Prozesskälte sowie andere elektronische Geräte in Abhängigkeit der Gebäudenutzung umfassen kann. [4]		
Einheit: 1. kWh/a 2. kWh/(m ² -a)	Bezugsgröße: 1. Jahr 2. Abhängig von Gebäudeart und Berechnungsverfahren: WG: beheizte Wohnfläche, Gebäudenutzfläche A _N NWG: Nutzfläche, Nettogrundfläche	
Ziel der Ermittlung des Indikators		
<ul style="list-style-type: none"> - Ermittlung des zusätzlichen nutzerabhängigen Stromanteils - Nachweisführung des Gebäudeenergie-Niveaus 		
Gesetzliche Anforderungen an den Indikator		
<ul style="list-style-type: none"> - an diesen Indikator bestehen keine direkten gesetzlichen Anforderungen 		
Indikatorwert bzw. Indikatorwertebereich		
Gebäudetyp	Anz. Kennwerte	Kennwerte
WG - MFH	1	17 kWh/(m ² -a)
WG - Wohnheim (Neubau)	1	20 kWh/(m ² -a)
Bewertung des Indikators		
Priorität: 	Häufigkeit der Anwendung: 	Einflussfaktoren: <ul style="list-style-type: none"> • Gebäudetyp¹⁾ • Technische Ausstattung • Berechnungsansatz
Quelle/n des Indikators		
Abschlussbericht: Campo_V, FKZ: 03EGB0011; MFH Möhringen, FKZ: 03EGB0015		
Anmerkungen		
¹⁾ Gebäudetyp spiegelt die Art und die Struktur der Nutzung wider.		

Abbildung 10: Aufbau und Gliederung des Indikator-Steckbriefs.

Die Steckbriefe zu den einzelnen Indikatoren enthalten eine kurze Beschreibung des Indikators, die typischen bzw. die verwendeten Einheiten, das Ziel der Ermittlung des Indikators, eventuelle gesetzliche Anforderung an den Indikator sowie dessen mögliche Weiterverwertung. Die Angabe des Indikatorwerts bzw. des Indikatorwertebereichs wird entweder für einzelne Gebäudetypen und/oder für einzelne Technologien angegeben. Sowohl die relevanten Gebäudetypen als auch die Technologien wurden nach Bedarf weiter spezifiziert. In den Steckbriefen wurden auch Einsparungen oder Anteile an einem Gesamtkennwert dokumentiert sowie die in Forschungsprojekten genannten Richtwerte, Ziele, Empfehlungen und Durchschnittswerte. Zusätzlich erfolgte die Bewertung des Indikators in Bezug auf Priorität, Häufigkeit der Anwendung und die Benennung der Einflussfaktoren, die bei der Interpretation bzw. Weiterverwendung der Werte zu beachten sind. Die Indikatorwerts selbst wurden nicht bewertet. Der Indikator-Steckbrief wurde mit der Angabe der Quellen sowie sonstigen Anmerkungen abgerundet.

Die Indikatoranalyse sollte den aktuellen Stand und die Entwicklungen von Indikatoren im Gebäudebereich darstellen sowie die Relevanz einzelner Indikatoren in Bezug auf Energieeffizienz und Klimaneutralität aufzeigen. Ziel war es, eine gemeinsame Grundlage für die Indikatoren zu schaffen, deren Anwendung zu harmonisieren und die Vergleichbarkeit sowie Reproduzierbarkeit zu erhöhen. Die Analyse ergab jedoch, dass die Vergleichbarkeit vieler Indikatoren oft schwierig ist und gemeinsame Randbedingungen definiert werden müssten. In vielen Projektabschlussberichten fehlten transparente und nachvollziehbare Angaben zu den Randbedingungen oder den wesentlichen Kennwerten. Auch die exakten Werte in Diagrammen wurden nicht dargestellt oder beschrieben. Dies führte zu einem hohen Aufwand, den Kontext zu verstehen, das Endergebnis (vor allem bei vielen Mess-, Test- oder auch Simulationsreihen) bzw. die wesentlichen Kennwerte (die Quintessenz) zu erfassen und die Ergebnisse

mit anderen Berichten zu vergleichen. Die Gruppierung von Indikatoren mit unterschiedlichen Bezeichnungen war nur möglich, wenn diese im jeweiligen Bericht erläutert wurden. Zudem fehlte häufig eine Differenzierung der Angaben, beispielsweise bezüglich der Art der Kosten (Herstellungskosten, Investitionskosten usw.). Die meisten Indikatoren bezogen sich auf Wohngebäude, während Nichtwohngebäude seltener untersucht wurden. Unterschiedliche Verfahren zur Ermittlung der Kennwerte erschwerten die Vergleichbarkeit weiter. Beispielsweise werden bei der energetischen Bewertung eines Gebäudes je nach Bewertungsmethode unterschiedliche Randbedingungen und Bilanzgrenzen angesetzt. Einige Projekte betrachteten den gesamten Endenergiebedarf eines Gebäudes, einschließlich des Nutzerstroms, was nicht dem aktuellen öffentlich-rechtlichen Nachweis für die Gebäudeenergieeffizienz (Energieausweis nach GEG) entspricht. Die Analyse zeigt, dass die Berücksichtigung von Treibhausgas-Emissionen oft über den Betrieb des Gebäudes hinausgeht und den gesamten Lebenszyklus einbezieht. Auf Basis der durchgeführten Analyse erscheint eine ähnliche Auswertung durch eine KI (Künstliche Intelligenz) oder eine anderweitige automatisierte Methode als gefährlich, da diese die unterschiedlichen und teilweise leider nicht angegebenen Randbedingungen höchstwahrscheinlich nicht wahrnehmen und aufschlüsseln könnte.

Abschließend lässt sich festhalten, dass die identifizierten Indikatoren sehr vielfältig sind und häufig nur bedingt miteinander vergleichbar. Die Unterschiede beruhen im Wesentlichen auf variierenden Grundlagen, Rahmenbedingungen und Bilanzgrenzen. Der Handlungsbedarf liegt in der Schaffung von Einheitlichkeit und Transparenz, um eine qualitativ und quantitativ hochwertige Datengrundlage zu gewährleisten. Eine vereinheitlichte Ermittlung und Angabe von Indikatoren und deren Werten sollte diskutiert werden. Für den Bereich der Einsparungen von Energie und klimaschädlichen Emissionen in den Gebäudeprojekten aus Energiewendebauen wurden dazu vom Modul II der Wissenschaftlichen Begleitforschung projektypabhängige Leitfäden zur Ermittlung und Skalierung dieser Einsparungen durch die Projektnehmer:Innen erarbeitet und veröffentlicht. In diesen wurden nicht nur die dafür benötigten Kennwerte definiert, sondern auch soweit möglich Randbedingungen, Ermittlungsmethoden und unterstützende Informationen zusammengestellt.

Die erarbeitete Indikatorübersicht kann als Arbeitsgrundlage für zukünftige Forschungsprojekte dienen und zeigt, welche Indikatoren bereits untersucht wurden. Sie erleichtert die Recherche nach Richtwerten, Empfehlungen, normativen und technischen Regeln sowie die Suche nach ähnlichen Forschungsprojekten. Die Indikatorübersicht bietet des Weiteren die Möglichkeit zur Aktualisierung der Kennwerte durch neue Forschungsprojekte sowie zur Ergänzung mit weiteren Vergleichswerten, Durchschnittswerten, Richtwerten, Empfehlungen, wichtigen Hinweisen und mit Expert:Innen-Wissen außerhalb der Forschungslandschaft.

3.3.5 Querauswertung zu Lessons Learned aus den Projekten der Forschungsinitiative EWB

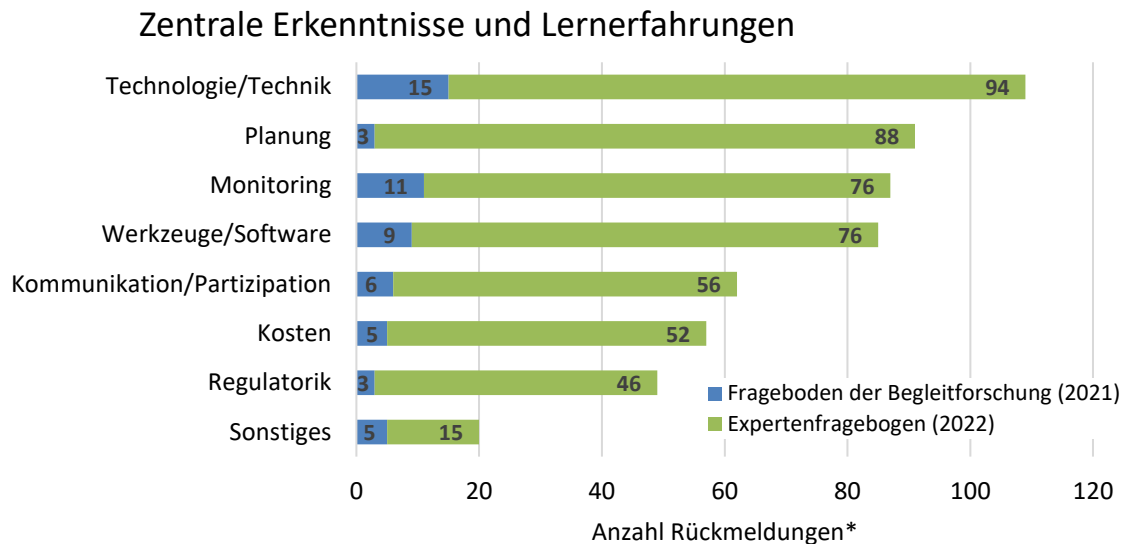
Im Rahmen des AP 3 wurde eine Auswertung der in der Forschungslandschaft gemachten Erkenntnisse und Erfahrungen, der so genannten „Lessons Learned“, durchgeführt. Lessons Learned können während der Durchführung von Vorhaben in einzelnen Projektphasen identifiziert, gesammelt und aufgezeichnet werden. Oft werden die gemachten Erfahrungen am Ende eines Projekts im Abschlussbericht dokumentiert. Das Ziel der Auswertung bestand darin, die durch Projekte gesammelten Erfahrungen zusammenzutragen, damit diese Erkenntnisse auf andere Gebäudeprojekte übertragen und ähnliche Projekte effektiver oder effizienter durchgeführt werden können. Die Lernerfahrungen aus den Projekten der Forschungslandschaft wurden mit Hilfe von zwei Befragungen gesammelt. Die Auswertung der Rückmeldungen aus der ersten Befragung führten zu acht unterschiedlichen Kategorien von Lessons Learned. Diese acht Kategorien wurden im Rahmen der zweiten Befragung verwendet, um die Breite der Antwortmöglichkeiten zu veranschaulichen und die Antworten inhaltlich zu unterteilen. Die

acht Kategorien sind in Abbildung 11 zusammengestellt. Im Zuge der Auswertung wurden die Rückmeldungen der Projektnehmer:Innen innerhalb jeder Kategorie thematisch sortiert und in Kernaussagen überführt. Ergänzend dazu wurde aus den Kernaussagen jeder Kategorie eine Zusammenfassung erstellt und die zentralen Erkenntnisse herausgearbeitet.



Abbildung 11: Verwendete Kategorien zur Erfassung und Einteilung von Lernerfahrungen (Lessons Learned), die innerhalb von Projekten der Forschungsinitiative Energiewendebauen gemacht wurden. Quelle: eigene Darstellung.

Die meisten Erfahrungen wurden in der Kategorie „Technologie/Technik“ gemacht (siehe Abbildung 12). Die Projekte stießen dabei auf Herausforderungen bei der Einführung neuer Technologien, beklagten die fehlenden oder unzureichenden technischen Schnittstellen und die Komplexität der Steuerungssysteme. Es wurde auch über Fortschritte in der Anwendung von Wasserstofftechnologie und regenerativer Energieversorgung sowie über die Optimierung von Anlagentechniken berichtet. Die »Planung« war eine weitere Kategorie, in der viele Projekte wertvolle Erkenntnisse gewonnen haben. Ein wesentliches Problem war die Komplexität der Koordinations- und Kommunikationsprozesse zwischen den Beteiligten, die vereinfacht und standardisiert werden sollte. Die Diskrepanz zwischen Planung und praktischer Umsetzung sowie die Bedeutung interdisziplinärer Arbeit wurden ebenfalls hervorgehoben. In der Kategorie „Monitoring“ wurde die Bedeutung effektiver Überwachungssysteme für die Fehlerdiagnose, Qualitätssicherung und Effizienznachweise betont. Trotz der Verfügbarkeit von Daten waren die Herausforderungen der Datenqualität, die Verarbeitung großer Datenmengen und die fehleranfällige drahtlose Datenübertragung signifikante Probleme. Die Kategorie „Werkzeuge/Software“ zeigte auf, dass der Überblick über vorhandene Werkzeuge oft fehlte und dass eine Konzentration auf die Weiterentwicklung bestehender Tools statt der Entwicklung neuer Tools vorteilhafter wäre. Die Nutzung von Open-Source-Tools zur Systemoptimierung und die Förderung von schnellen Anpassungen durch digitale Modelle waren ebenfalls von Bedeutung. Die Kategorien „Kommunikation/Partizipation“, „Kosten“ und „Regulatorik“ erhielten zwar weniger Erkenntnisse, waren aber für den Projekterfolg und die Energiewende von entscheidender Bedeutung. Die frühzeitige und aktive Einbindung von Nutzer:Innen und Beteiligten sowie die Bewältigung von Kostensteigerungen und die Anpassung an regulatorische Rahmenbedingungen waren hier zentrale Themen.



* ohne Anzahl der Rückmeldungen »zu früh im Projekt«, »keine Angabe« und »keine«.

Abbildung 12: Lernerfahrungen der Projekte je Themenbereich gemäß den Umfrageergebnissen des Fragebogens der Wissenschaftlichen Begleitforschung 2021 und der Expertenbefragung 2022. Quelle: eigene Darstellung.

Die Dokumentation der Lernerfahrungen ermöglicht es, aus vergangenen Projekterfahrungen zu lernen, erfolgreiche Praktiken zu implementieren und ähnlichen Hemmnissen entgegenzuwirken, sodass die Effizienz und die Erfolgsquote bei der Planung und Umsetzung eigener Projekte gesteigert werden können. Außerdem können daraus Handlungs- und Forschungsbedarfe abgeleitet und die dafür erforderlichen Maßnahmen oder Schritte in die Wege geleitet werden.

3.3.6 Leitfäden zur Ermittlung von Einspareffekten an Energie und klimaschädlichen Emissionen bei der Umsetzung von Forschungsvorhaben und deren Skalierung

Eine der vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie für das Begleitforschungsmodul „Gebäude“ der Forschungsinitiative Energiewendebauen im Jahr 2019 ausgeschriebenen Aufgaben war die „Quantifizierung des Potenzials der Einspareffekte an Energie und klimaschädlichen Emissionen bei der Umsetzung der Forschungsvorhaben und deren Skalierung“. Die Arbeitsbeschreibung der Begleitforschung sah vor, die erforderlichen Kennwerte für die Energie- und Treibhausgasemissions-Einsparung über Fragebögen von den Projektnehmer:Innen der dem BF-Modul „Gebäude“ zugeteilten Vorhaben abzufragen und diese mit weiteren Kennwerten und Informationen aus Abschlussberichten und ggf. Projektinterviews zu verdichten.

Leider ergab die Auswertung des Fragebogens der Wissenschaftlichen Begleitforschung im Herbst 2021 [27], dass von 95 Projektnehmer:Innen, die den Fragebogen für ihr Projekt mit Schwerpunkt Gebäude beantwortet haben, nur 14 die Frage „Haben Sie für Ihr Vorhaben Energieeinsparpotenziale im Rahmen des Antrags bzw. in der Projektphase ermittelt?“ mit „ja“ beantwortet haben. Nur zwei bzw. drei Projektnehmer:Innen konnten entsprechende Werte für die eingesparte Endenergie in kWh/a bzw. kWh/m²a eintragen. Bei der Frage nach den Treibhausgas-Einsparungen ergab sich ein sehr ähnliches Bild. Zusätzlich waren die Eintragungen zur Beschreibung des verwendeten Rechenweges, u. a. im Bereich der angewandten Berechnungsmethode und dem verwendeten Referenzfall, stark unterschiedlich und Ermittlungen der grauen Energie (Lebenszyklusbilanzierung) sowie eine Skalierung der Einsparungen für gleichartige Gebäude in Deutschland wurden nur sehr selten durchgeführt bzw. geplant. Abbildung 13 stellt die Auswertung des Fragebogens grafisch dar.

Auswertung des Fragebogens der Wissenschaftlichen Begleitforschung im Herbst 2021

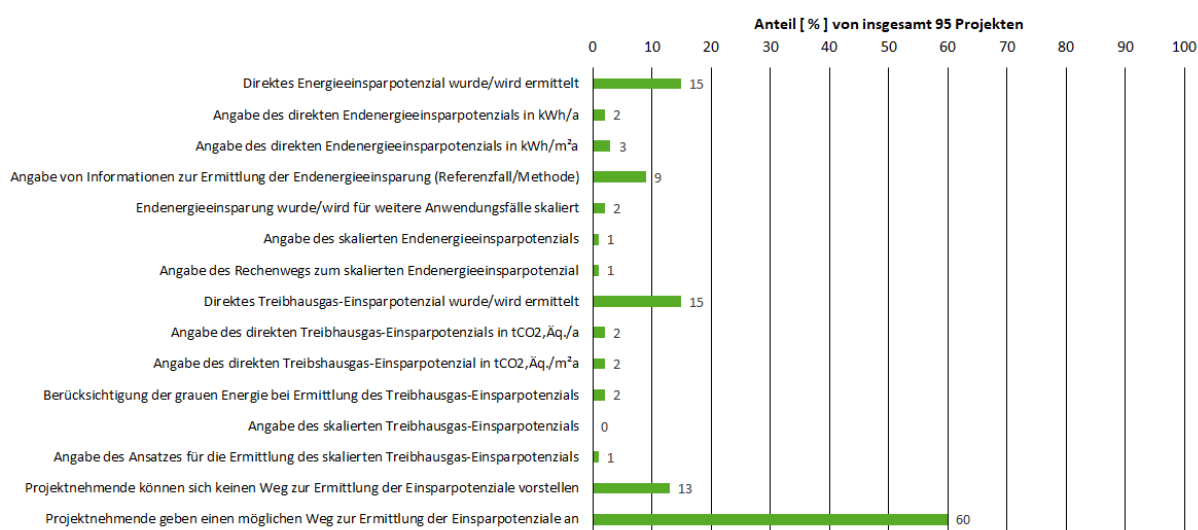


Abbildung 13: Auswertung des Fragebogens der Wissenschaftlichen Begleitforschung im Themenbereich der Einsparpotenziale der Forschungsprojekte. Quelle: eigene Darstellung.

Mit den Projektleiter:Innen der 14 Projekte wurden vom Modul „Gebäude“ der Begleitforschung Interviews durchgeführt, um genauer zu verstehen, warum und wie manche Kennwerte ermittelt werden konnten oder noch im weiteren Verlauf des Vorhabens ermittelt werden sollten und warum andere Kennwerte nicht ermittelt werden können.

Als Alternative zur Abfrage von Einsparpotenzialen innerhalb der Fragebögen und der ergänzenden Informationseinholung durch Projektinterviews wurden Abschlussberichte von Vorhaben, die dem Gebäudemodul der Begleitforschung zugeordnet wurden, analysiert. Mitte 2022 bis Anfang 2023 wurde eine Stichprobe von insgesamt 27 Abschlussberichten ausgewertet. Aus den Berichten konnten ebenfalls nur wenige Kennwerte für die Endenergieeinsparung (7 Kennwerte in kWh/m²a), die Primärenergieeinsparung (3 Kennwerte in kWh/m²a) und die Einsparung an Treibhausgasemissionen (1 Kennwert in kg/m²a) entnommen werden. Eine Skalierung auf gleichartige Gebäude und eine Ermittlung der grauen Energien erfolgte in nur zwei Fällen.

Fazit: Die Analyse der Abschlussberichte durch die Begleitforschung ergab, dass derzeit in zu wenigen Abschlussberichten Einsparpotenziale der Forschungsvorhaben angegeben werden. Dies gilt für die Anzahl der identifizierten Kennwerte in allen drei Bereichen (Endenergie, Primärenergie und Treibhausgasemissionen). Hier muss allerdings berücksichtigt werden, dass es derzeit keine strikte Vorgabe zur Ermittlung der Einsparpotenziale in den Projekten gibt bzw. zu geben scheint. Andererseits bewertet auch die Begleitforschung bei vielen der stark unterschiedlichen Projekttypen und Projektzielen eine Ermittlung der Einsparpotenziale als schwierig oder zumindest aufwändig. Dies trifft noch mehr für die Erweiterung der Ermittlung in Bezug auf die Lebenszyklusanalyse und die Skalierung zu. In einigen der ausgewerteten Projekte war Energieeinsparung nicht das eigentliche Projektziel, sondern z. B. Flexibilisierung, Dauerhaftigkeit, Leitfäden für Einsparcontracting, Fehlervermeidung, Speicherfähigkeit, Entwicklung eines Messsystems, etc. Ein weiteres Ergebnis der Analyse der Abschlussberichte ist, dass die Kennwerte für Einsparpotenziale in den Berichten meist aufwändig gesucht werden müssen, d. h. an unterschiedlichen Stellen im Bericht festgehalten wurden und die Randbedingungen wie Ermittlungsmethoden, Referenzfälle, Energiebezugsflächen etc. teilweise an anderen Stellen (Kapiteln) enthalten sind oder teilweise nicht oder nicht nachvollziehbar angegeben wurden. Aufgrund der unterschiedlichen Randbedingungen und Unklarheiten ist auch eine Querauswertung, z. B. für die Hochrechnung auf die Gebäudeprojekte der Forschungsinitiative, derzeit nicht möglich.

Diese Situation wurde mit dem Projektträger besprochen und es wurde gemeinsam beschlossen, statt der Auswertung von nur sehr begrenzt vorhandenen und wenig vergleichbaren Einsparpotenzialen, einen Leitfaden zur Ermittlung der Einsparpotenziale für die Projektnehmer:Innen zu entwickeln. Bei der Ausarbeitung erfolgte eine mehrmalige Abstimmung mit dem Projektträger, vor allem bezüglich der Referenzfälle, der möglichen Nutzung von gemessenen Werten, der gewünschten Skalierung und der Einbeziehung von digitalen Aufwänden in den Projekten. Die Einsparpotenziale sollen dabei zunächst in der Projektskizze abgeschätzt und dann im Abschlussbericht detaillierter ermittelt und dokumentiert werden. Der generelle Ermittlungsweg soll in Projektskizze und Abschlussbericht der gleiche sein, jedoch können für die Skizze die Berechnungen ggf. vereinfacht werden.

Da es sich bei den Vorhaben, die dem Bereich „Gebäude“ vom PtJ zugeordnet werden, um viele unterschiedliche Projekttypen handelt (von Technologieentwicklungen über Demonstrationsprojekte, Konzepte, Betriebsoptimierungen, Herstellungsprozesse bis hin zu Methoden- und Softwareentwicklungen, etc.), muss die Methode entsprechend auf den Projekttyp angepasst werden. So entstanden insgesamt sechs verschiedene projekttypabhängige Leitfäden. Für einige Projekttypen, die nicht direkt auf ein Gebäude angewendet werden, schlägt die Begleitforschung vor, keine Einsparermittlung durchzuführen, da ihr Einsparpotenzial schwer zu beurteilen ist. Dazu gehören z. B. Softwareentwicklungen, Datenerhebungen und Leitfäden. Sind diese Arbeiten jedoch in einem Projekt mit konkreteren Aufgaben wie z. B. Technologieentwicklung oder Demonstrationsgebäude verbunden, soll für diese Bereiche eine Ermittlung der Einsparpotenziale durchgeführt werden.

Der von der Begleitforschung vorgeschlagene Ermittlungsweg sieht die in Abbildung 14 zusammengestellten fünf Schritte vor:

1.	Projekttyp	Zuordnung zu einem der 6 Projekttypen bzw. einem weiteren Projekttyp für den derzeit (noch) keine Ermittlung des Einsparpotenzials vorgesehen ist. Entsprechend Wahl des passenden Leitfadens.
2.	Referenzfall	Definition des Referenzfalls. Dieser ist bei einigen Projekttypen abhängig von der Art des Anwendungsgebäudes (Neubau oder Sanierung).
3.	Ermittlung der Endenergie-, Primärenergie- und Treibhausgas-Einsparungen	Durchführung der vorgegebenen Ermittlungsmethode, meist eine Berechnung, in Einzelfällen Simulation oder Messung.
	a. Betriebsphase	Energiebedarf bzw. Treibhausgasemissionen für den Betrieb eines Gebäudes.
	b. Sonstige Lebenszyklusphasen	Durchführung einer Ökobilanz, ggf. vereinfacht.
	c. Digitale Lösungen	Meist Mehraufwand durch Stromverbrauch und Material von dafür benötigten Komponenten.
4.	Skalierung	Skalierung auf die Anwendung innerhalb Deutschlands.
	a. Theoretisch maximal	Verwendung von Gebäudestatistiken.
	b. Realistisch	Einschränkung des Marktpotenzials.
5.	Zusätzlicher Indikator (freiwillig)	Möglichkeit für die Angabe eines zusätzlichen freiwilligen Indikators ebenfalls im Vergleich zu einem Referenzfall.

Abbildung 14: Erforderliche Schritte für die Bestimmung des Einsparpotenzials an Energie und klimaschädlichen Emissionen durch die Projekte im Bereich Gebäude aus der Forschungsinitiative Energiewendebauen.

Die einzelnen Schritte werden in den Leitfäden [28], [29], [30], [31], [32], [33] und im zugehörigen Bericht [34] erläutert. Abbildung 15 zeigt ein Titelblatt eines Leitfadens.

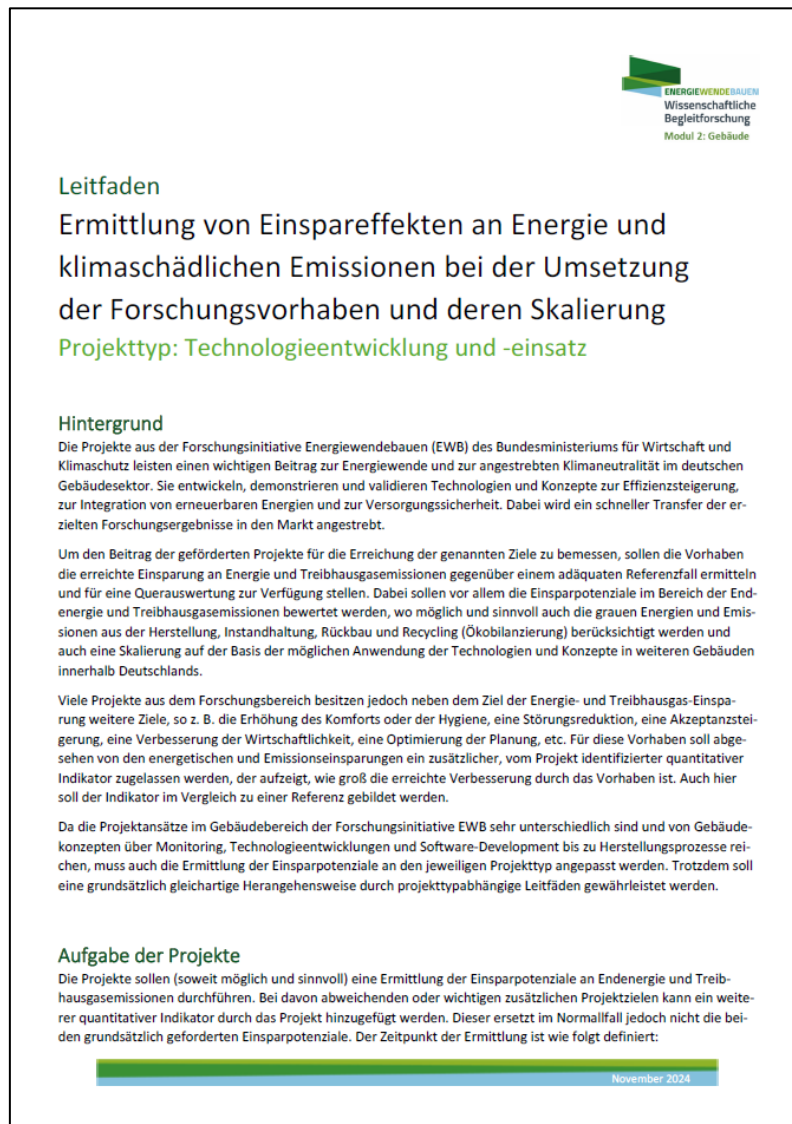


Abbildung 15: Titelblatt des Leitfadens für den Projekttyp Technologieentwicklung und -einsatz zur Ermittlung von Einspareffekten an Energie und Klimaschädlichen Emissionen.

Die Leitfäden enthalten Vorgaben zu Ermittlungswegen (meist Berechnungen, teilweise Simulationen oder Messungen), Randbedingungen sowie Hinweise auf mögliche Hilfsmittel und Datengrundlagen. Tabelle 6 zeigt eine Übersicht über die Vorgaben zur Ermittlung der Einspareffekte an Energie und klimaschädlichen Emissionen bei der Umsetzung der Forschungsvorhaben je nach Projekttyp.

Tabelle 6: Übersicht über die Vorgaben zur Ermittlung der Einspareffekte an Energie und klimaschädlichen Emissionen bei der Umsetzung der Forschungsvorhaben.

Projekttyp	Demonstrationsgebäude bzw. Konzept-/Planungsphasen als Vorbereitung zu einem Umsetzungsprojekt	Studien und Konzeptentwicklung ohne Gebäudeumsetzung	Konzeptentwicklung inkl. Feldmessung	Technologieentwicklung und -einsatz	Betriebsoptimierung	Herstellungsprozesse	Methodenentwicklung ohne Feldtest	Softwareentwicklung	Messsystementwicklung	Datenerhebung	Leitfäden	Materialgrundlagenforschung
Gebäudeanwendung	Konkrete(s) Gebäude aus Projekt	Typisches Gebäude (real oder theoretisch)	Konkrete(s) Gebäude aus Projekt, ggf. „mittleres“ Gebäude	Mit Gebäudeanwendung: konkretes Gebäude aus Projekt Ohne Gebäudeanwendung: typisches Gebäude	An Gebäuden: konkrete(s) Gebäude aus Projekt Ohne Gebäudeumsetzung: typisches Gebäude	Keine. Bewertung auf Basis des Herstellungsprozesses.	Derzeit keine Ermittlung der Einspareffekte vorgesehen.					
Referenzfall	Neubau: aktuelle GEG-Anforderung Sanierung: <ul style="list-style-type: none"> • 140 % des Referenzgebäudes aus GEG • Rein baulich: GEG Anlage 7 			Ähnliche Technologie, vorwiegend eingesetzt für die Erfüllung der gleichen Aufgabe	Neubau: Stand der Technik Bestand: vorhandene Regelung im Ist-Zustand, ggf. typische Regelung	Bisher eingesetzte Produktionsmethode für das gleiche Material/Bauteil/Technologie						
Bewertungsmethode Betriebsphase	DIN V 18599, ggf. Simulation mit Randbedingungen aus GEG/DIN V 18599				Neubau: Simulation Bestand: Messung möglich	-						
Sonstige Lebenszyklusphasen	Vergleich der Technologien auf Basis von Ökobilanzdaten bzw. QNG-Verfahren			Vergleich der Technologien auf Basis von Ökobilanzdaten	-	Vergleich des Herstellungsprozesses mit Ökobilanzdaten						
Aufwände für digitale Lösungen	Datenprozesse und Komponenten auf Basis wissen-digital-ewb					-						
Skalierung	Theoretisch maximal und realistisch											
Zusätzlicher quantitativer Indikator	Freiwillig möglich											

Die Begleitforschung testete die Ermittlungsmethode an insgesamt drei unterschiedlichen Vorhaben. Die Rückmeldungen aus den Testfällen wurden in die Leitfäden als Verbesserungen eingearbeitet. Die ausgefüllten Ergebnistabellen für einen der Testfälle sind im zugehörigen Bericht als Beispiel enthalten.

Die Testanwender:Innen meldeten vor allem folgende Herausforderungen:

- Für die Ermittlung der Einsparpotenziale sind in den allermeisten Fällen Kenntnisse des Gebäudeenergiegesetzes (GEG) und der DIN V 18599 erforderlich, da auf diesen der Ermittlungsweg und teilweise auch der Referenzfall beruhen oder deren Randbedingungen wie z. B. (detaillierte) Nutzerprofile auch in Simulationen eingesetzt werden sollen.
- Die Skalierung auf eine mögliche deutschlandweite Anwendung ist abhängig von der Einschätzung der Projektnehmer:Innen und damit subjektiv.

Beide Punkte wurden vorab und nach der Testanwendung mit den Mitarbeiter:Innen des Projektträgers Jülich diskutiert. Neben den Grundkenntnissen des GEG und der DIN V 18599 empfehlen sich auch Grundkenntnisse im QNG (Qualitätssiegel Nachhaltiges Gebäude) und der zugehörigen Ökobilanzdaten für die Ermittlung der Einsparungen in den weiteren Lebenszyklusphasen. Trotzdem wurden diese Ermittlungswege und Randbedingungen für die Leitfäden gewählt, da sie deutschlandweit im Gebäudebereich für Energieausweise, Bauanträge und Fördermaßnahmen eingesetzt werden und mit vorgegebenen Rahmenbedingungen operieren und damit vergleichbare und querauswertbare Ergebnisse erzielen. Auch die Referenzfälle für Gesamtgebäudekonzepte und Demonstrationsvorhaben werden über die Anforderungen aus dem GEG abgebildet. Während dies im Neubau 55 % des Primärenergiebedarfs des GEG-Referenzgebäudes entspricht, wurde auf expliziten Wunsch des Projektträgers der Referenzfall bei Sanierungen auf 140 % des Primärenergiebedarfs des GEG-Referenzgebäudes festgelegt. Damit berechnen sich die Einsparungen nicht gegenüber dem Zustand vor der Sanierung, sondern gegenüber einem entsprechenden Gebäude mit einem Primärenergieverbrauch von 140 % des GEG-Referenzgebäudes. Für die Projektnehmer:Innen bedeutet dies auch, dass sie entsprechend ein baubares GEG-Anforderungsgebäude (mit 55 % bzw. 140 % des Primärenergiebedarfs des GEG-Referenzgebäudes) entwickeln müssen, um zusätzlich zu den Primärenergieeinsparungen auch die Treibhausgas-Einsparung und danach auch die Einsparungen bzw. Mehraufwände in den sonstigen Lebenszyklen zu ermitteln. Sollten diese Kenntnisse nicht im Team der Projektnehmer:Innen vorhanden sein, könnte diese Aufgabe im Rahmen des Projektantrags auch fremdvergeben werden. Die Freiheiten der Projektnehmer:Innen in der Skalierung sollen durch dokumentierte und nachvollziehbare Grundlagen und Reduktionsfaktoren für den Schritt zwischen theoretisch maximaler Skalierung und realistischer Skalierung eingeschränkt werden. Ggf. könnte auch der Projektträger oder eine zuständige Begleitforschung eine Rückmeldung zu den Skalierungsfaktoren geben. Einen Vorschlag oder gar eine Vorgabe für einen allgemein anzuwendenden Skalierungsfaktor erscheint aufgrund der zu unterschiedlichen Projekte und Projekttypen nicht möglich. Dies wurde auch durch die Auswertung der Testfälle bestärkt.

Die ursprünglich angestrebte Querauswertung, ggf. auch die Ermittlung des Gesamteinsparpotenzials aller Forschungsvorhaben im Gebäudebereich der Energiewendebauen-Forschungsinitiative, kann in einem zweiten Schritt erfolgen, wenn die Antragsteller:Innen bzw. Projektnehmer:Innen vom Projektträger Jülich aufgefordert werden, die Leitfäden in ihren Projektskizzen und vor allem in den Projektabschlussberichten anzuwenden. Damit wird es sicherlich auch weitere Rückmeldungen zu den Leitfäden geben und damit ggf. Verbesserungspotenzial oder zumindest weitere Hinweise auf mögliche Hilfestellungen.

Da sich die gesetzlichen Anforderungen an Gebäude in der Zukunft auch weiterentwickeln werden, müssen vermutlich die Leitfäden entsprechend angepasst werden. Denkbar sind hier strengere Anfor-

derungen an Neubauten und Bestandssanierungen im GEG und gesetzliche Anforderungen an die anderen Phasen der Lebenszyklusbewertung. Die Leitfäden bilden hier (nur) den derzeitigen Stand ab. Zusätzlich werden sich die Primärenergiefaktoren und Treibhausgas-Äquivalente von einigen Energieträgern wie dem deutschen Strommix und Fernwärme in den nächsten Jahren weiter reduzieren. Damit sind die ermittelten Einsparpotenziale aus unterschiedlichen Jahren nicht genau miteinander vergleichbar, dies ist jedoch unvermeidlich.

3.4 **Arbeitspaket 4 (AP 4): Bausteine für einen klimaneutralen Gebäudebestand 2050**

3.4.1 **AP4.1: Energetische Gebäudesanierung als Kernbaustein der Energiewende**

Die Sanierung und Modernisierung des Gebäudebestands ist die Kernaufgabe der Gebäudeenergie-wende. Im Rahmen des Projekts RokiG wurden beide Begriffe als Maßnahmen an der Gebäudehülle und der Anlagentechnik verstanden. Ziel dieser Maßnahmen ist die Senkung der CO₂-Emissionen eines Gebäudes durch erhöhte Energieeffizienz und die Einbindung erneuerbarer Energien in das Gebäudeenergiesystem. In Arbeitspaket 4.1 wurde diese Thematik intensiv beleuchtet, indem unterschiedliche Einflüsse auf die Sanierung identifiziert und analysiert wurden und anschließend modellbasiert optimierte Maßnahmen für unterschiedliche Gebäudetypen ermittelt und auf verschiedenen Detail-ebenen untersucht wurden. Das AP wurde maßgeblich vom Projektpartner RWTH EBC bearbeitet und bei der Recherche sowie Projektbefragung zu den Einflussfaktoren auf die energetische Gebäudemodernisierung durch Arbeiten des Fraunhofer IBP ergänzt.

Ziele des Arbeitspakets

- Ermittlung wirtschaftlicher, technischer, ökologischer und sozialer Haupteinflussfaktoren auf die energetische Gebäudemodernisierung
- Ermittlung optimierter Sanierungs- und Modernisierungsmaßnahmen zur Emissionseinsparung in Abhängigkeit von Gebäudetypen
- Quantifizierung des Potenzials der Einspareffekte an Energie und klimaschädlicher Emissionen bei der Umsetzung der Forschungsvorhaben
- Potentialermittlung von innovativen Zukunftskonzepten im Bestand
- Entwicklung robuster Gebäudeenergiekonzepte gegenüber dem Nutzer:Innen-Verhalten und ökonomischen Randbedingungen
- Untersuchung der Suffizienz von Nutzenden im Gebäudesektor

Methoden

- Literaturrecherche zu wirtschaftlichen, technischen, ökologischen und sozialen Haupteinflussfaktoren auf die Modernisierung
- Projektbefragung zur Sammlung weiterer Einflussfaktoren und Bewertung der gesammelten Faktoren
- Aufbau und Anwendung mathematischer Optimierungsmodelle zur Erstellung von Modernisierungsfahrplänen für Einzelgebäude
- Sensitivitätsanalyse von Input-Parametern des Optimierungsmodells durch Morris-Screening und Sobol-Methode

Ergebnisse:

- Ermittlung relevanter Modernisierungseinflüsse:
 - Die Literaturrecherche zeigt Investitionen, Energiekosteneinsparungen sowie die Effizienz neuer Technologien als wesentliche Einflüsse
 - Die Expertenbefragung bestätigt den hohen Einfluss der ökonomischen und technischen Faktoren, unterstreicht aber auch soziale Faktoren wie bspw. die Altersstruktur der Gebäudebesitzer:Innen.
 - Die modellbasierte Sensitivitätsanalyse ergibt den Kalkulationszinssatz, Energiepreise, Emissionsfaktoren, technische Spezifikationen neuer Anlagen, sowie den Nutzstrombedarf als wesentliche Einflüsse auf die kosten-emissionsoptimierte Auslegung.

- Optimierte Modernisierungsentscheidungen:
 - Die Ergebnisse zeigen unterschiedliche Modernisierungsfahrpläne je nach Gebäudetyp und weiteren Randbedingungen, wie Art und Alter des Bestandsheizsystems.
 - Es zeigen sich bis zu Emissions-Einsparzielen von 50-75 % bezogen auf den Ausgangszustand in etwa linear ansteigende CO₂-Vermeidungskosten. Bei ambitionierteren Einsparzielen steigen die Kosten exponentiell an.
- Realisierungszeiten energetischer Modernisierungsmaßnahmen konnten gesammelt und publiziert werden.

3.4.1.1 Aufbau eines Optimierungsmodells

Gebäudemodell

Im AP 4.1 wurde ein Optimierungsmodell entwickelt, das modellbasiert kosten-emissionsoptimale Modernisierungsentscheidungen für Gebäude ermittelt. Ziel des Modells ist es, Maßnahmen wie Dämmung und Anlagentausch für ein gegebenes Gebäude unter Berücksichtigung verschiedener Randbedingungen (z. B. Investitionskosten für unterschiedliche Technologien, Energiepreise, Wetterdaten und Emissionsfaktoren von Energiequellen) zu bestimmen. Das Modell minimiert als Zielfunktionen die Gesamtkosten über einen Zeitraum von bis zu 30 Jahren, bestehend aus Anschaffungs-, Energie-, Wartungs- und Instandhaltungskosten, sowie die kumulierten Emissionen, die durch die Verwendung von Energieträgern wie Strom, Gas und fester Biomasse entstehen. Entscheidungsvariablen umfassen die Dimensionierung und den Betrieb von Anlagen zur Wärme-, Kälte- und Stromerzeugung sowie zur Speicherung, die Dämmung von Außenwänden, Dächern, Kellerdecken und den Austausch von Fenstern. Zusätzlich wird der Zeitpunkt der Umsetzung einzelner Maßnahmen optimiert, um Modernisierungsfahrpläne abzuleiten, die sowohl ökonomisch als auch ökologisch sinnvoll sind. Abbildung 16 zeigt die Superstruktur des vorgestellten Optimierungsmodells und veranschaulicht die zur Wahl stehenden Energiequellen, die Komponenten zur Erzeugung und Speicherung sowie Elemente der Bedarfsberechnung und deren Interaktion mit der Gebäudehülle. Eine detaillierte Beschreibung des Optimierungsmodells für Modernisierungsfahrpläne kann der peer-reviewed Veröffentlichung entnommen werden [35].

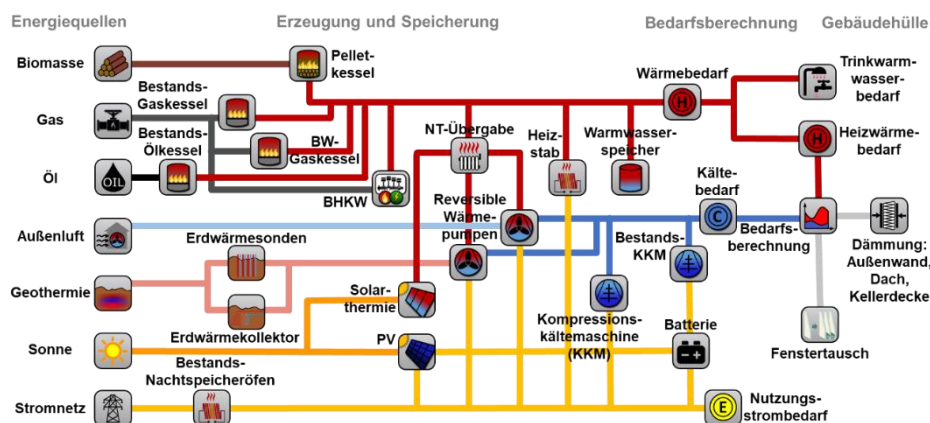


Abbildung 16: Superstruktur des Optimierungsmodells.

In der Modellentwicklung wurden verschiedene Ansätze der Gebäudeenergiebedarfsberechnung verglichen. Hierzu gehören die Bedarfsberechnung mittels eines sogenannten Kapazitätenmodells, bei welchem eine elektrische Ersatzschaltung aus Widerständen und Kapazitäten Wärmeübergänge und Wärmespeicherfähigkeit an und in einem Gebäude modellieren. Außerdem wurden ein Energiebilanzmodell, das auf der Gebäudeenergiebilanz basiert, und ein detailliertes Simulationsmodell (sogenanntes high-order Modell) entwickelt und untersucht. Ein Vergleich zeigte, dass nur das Energiebilanz- und das Kapazitätenmodell für die Optimierungsrechnungen genutzt werden konnten. Das high-order Modell verursachte zu hohe Rechenzeiten bzw. ist aufgrund der zahlreichen Nichtlinearitäten nicht in das

gemischt ganzzahlige Optimierungsmodell integrierbar. Da dieses Modell aber das detaillierteste der angesprochenen Modelle darstellt, diente es als Referenz zur Validierung der anderen beiden Modelle. Abbildung 17 zeigt einen Ausschnitt der Validierung, indem die Lastkurven des High-order-Modells und des Kapazitätenmodells an einem typischen Winter- und einem Sommertag gegenübergestellt werden. Es zeigt sich eine gute Übereinstimmung dieser Kurven.

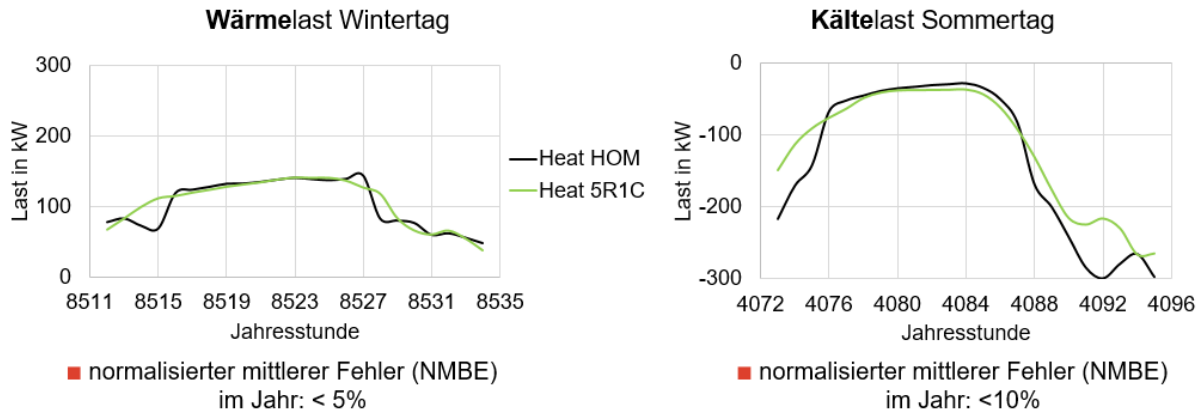


Abbildung 17: Validierung der Bedarfsberechnung im Optimierungsmodell zur Ermittlung von Sanierungsmaßnahmen.

Des Weiteren können Kennwerte Aufschluss darüber geben, wie hoch die Unterschiede der Lastkurven über ein gesamtes Jahr sind (Abbildung 17 unter den Lastkurven). Für die durchgeführte Validierung sind diese Kennwerte innerhalb der ASHRAE Guideline 14 [36], die einen NMBE von unter 5 % für monatliche Daten und von unter 10 % für tägliche Daten als Obergrenze für kalibrierte Modelle definiert.

Skalierung auf Portfolioebene

Weitere Modellentwicklungen betrafen die Skalierung des Modells auf Gebäudebestandsebene in Verbindung mit AP 4.5. In dem unter AP 4.5 vorgestellten zweistufigen Ansatz zur Portfoliooptimierung, vgl. Abbildung 18, fließen verschiedene Modernisierungsfahrpläne verschiedener Typgebäude aus dem Fahrplanmodell aus AP 4.1 ein. Hierzu wurde zunächst der Gebäudebestand archetypisiert. Es wurden die Gebäudetypen Einfamilienhaus, Mehrfamilienhaus, Restaurant, Schule, Krankenhaus, Handel und Büro berücksichtigt. Zur Berücksichtigung verschiedener Gebäudedämmstandards wurde in drei verschiedene Baualtersklassen unterschieden. Da 80 % des deutschen Gebäudebestands in sechs deutschen Klimaregionen des Deutschen Wetterdienstes liegen, wurde der Gebäudebestand vereinfachend durch diese sechs Klimaregionen dargestellt. Die Kombination aller Ausprägungen ergibt eine Darstellung des Gebäudebestands durch 126 Archetypen. Für alle Archetypen wurden sieben kostenemissionsoptimale Modernisierungsfahrpläne mit unterschiedlicher Gewichtung zwischen Kosten und Emissionen aufgestellt. Diese dienten als Input für das Portfoliomodell aus AP 4.5.

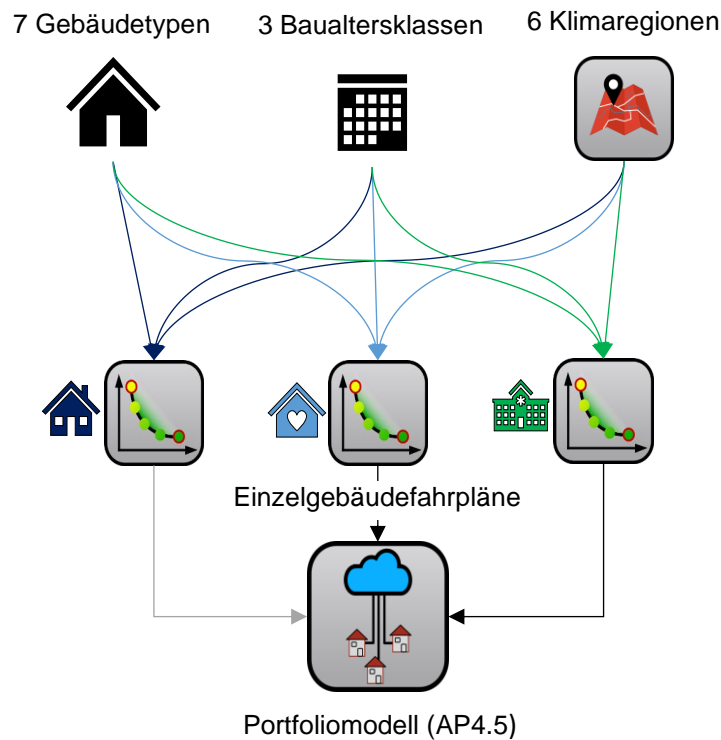


Abbildung 18: Generierung von Modernisierungsfahrplänen für verschiedene Gebäudearchetypen als Input für ein Portfoliooptimierungsmodell. Quelle: eigene Darstellung.

3.4.1.2 Ermittlung relevanter Modernisierungseinflüsse

Ein weiterer Schwerpunkt des AP 4.1 lag auf der Ermittlung relevanter Modernisierungseinflüsse. Hierzu wurde auf einen mehrstufigen Ansatz zurückgegriffen. Zunächst wurden relevante Einflüsse auf Basis einer Literaturrecherche gesichtet. Diese wurden danach durch Expertenbefragungen nach ihrer Wichtigkeit geordnet. Anschließend wurden diese Einflüsse in das Berechnungsmodell integriert und eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt, um zu quantifizieren, inwiefern die Einflüsse die Auslegung von Gebäudeenergiesystemen beeinflussen.

Auswertung relevanter Literatur und Expertenbefragung

Zunächst wurden die EWB-Forschungsprojekte im Bereich Sanierung und Modernisierung analysiert und es wurden auf Grundlage von Projektbeschreibungen, Veröffentlichungen und Websites weitere potenzielle Einflüsse auf die Sanierung und Modernisierung gesammelt. Wie in Abbildung 19 zu sehen ist, lassen sich diese in die Kategorien wirtschaftliche, ökologische, technische und soziale Einflüsse differenzieren. Beispielhaft führt Abbildung 19 zu jeder genannten Kategorie verschiedene Einflüsse auf.

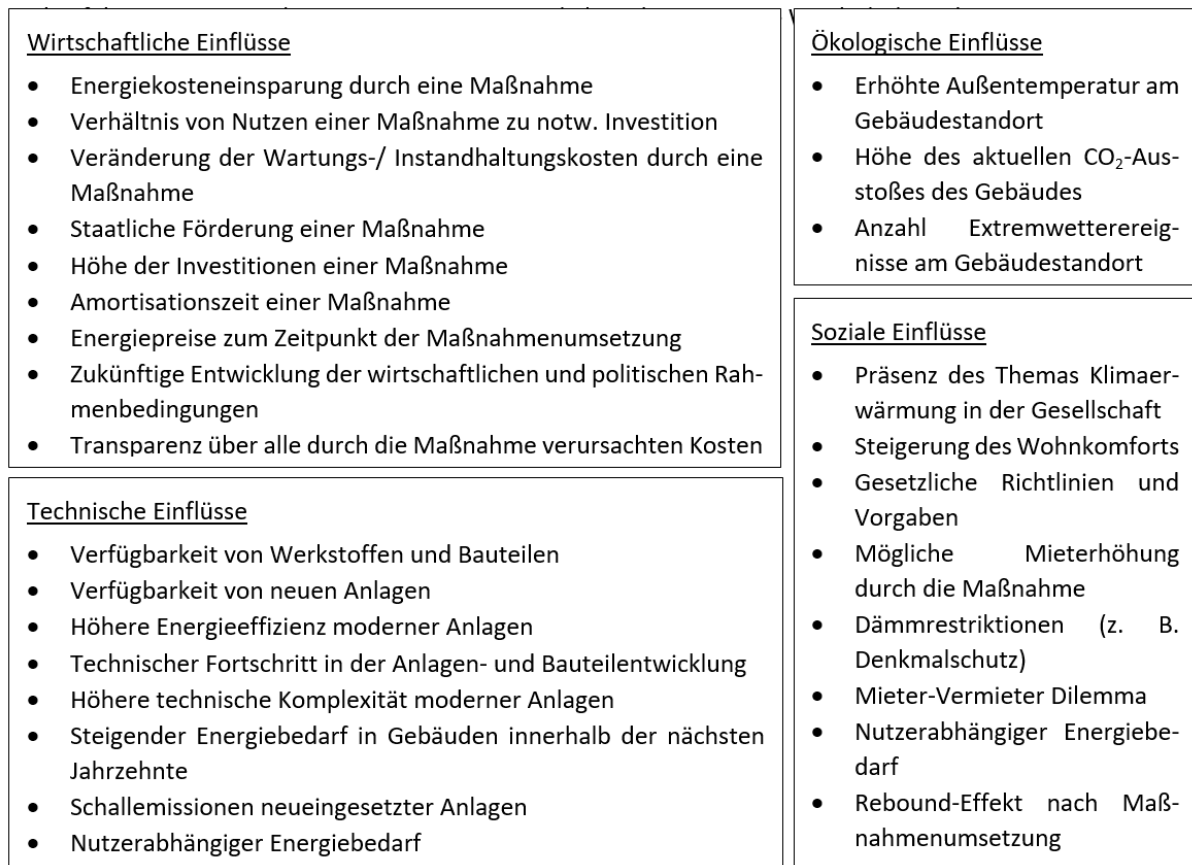


Abbildung 19: Identifizierte Einflüsse auf die Gebäudemodernisierung auf Basis des Screenings von Projektberichten.

Um die gesammelten Einflüsse auf die Modernisierungsentscheidungen untereinander gewichten zu können, wurden Fragen zu ökologischen, ökonomischen, technischen und sozialen Einflüssen im gemeinsamen Fragebogen der BF integriert. Abbildung 20 zeigt einen Ausschnitt der Ergebnisse dieser Befragung. Die Höhe des Einflusses der genannten Kategorien auf die Sanierungsentscheidung wurde zwischen „sehr gering“ und „sehr hoch“ bewertet, wobei v. a. ökonomische und technische Einflüsse häufig mit hohem Einfluss bewertet wurde. Meistgenannt wurden bei den ökonomischen Einflüssen notwendige Investitionen, Energiekosteneinsparungen und das Verhältnis von Kosten/Nutzen bei den Maßnahmen. Als technische Einflüsse wurden v. a. die Effizienz moderner Anlagen, der Fortschritt in der Technologieentwicklung und die Verfügbarkeit neuer Technologien genannt.

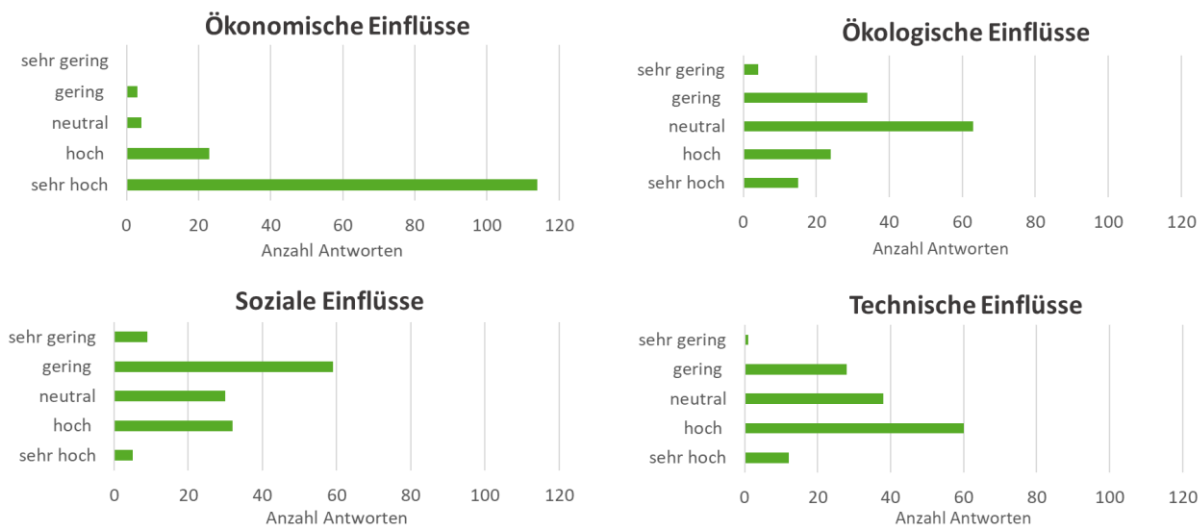


Abbildung 20: Bewertung der Einflüsse unterschiedlicher Kategorien auf die Sanierungsentscheidung basierend auf der Expertenbefragung.

Diese Ergebnisse wurden auf dem Projektetreffen im Herbst 2021 im Rahmen eines Workshops mit den Projektbearbeiter:Innen diskutiert und weiterer Input gesammelt. Auch hier wurden ökonomische und technische Einflüsse viel diskutiert. Zusätzlich wurden soziale Einflüsse diskutiert, wobei v. a. die zukünftige Vermietbarkeit, die Altersstruktur von Gebäudebesitzer:Innen sowie deren nachhaltiges Image als Einflüsse genannt wurden. Weitere Details können dem Veranstaltungsbericht entnommen werden [37].

Modellbasierte Sensitivitätsanalyse

Inputs für das Optimierungsmodell in AP 4.1 sind verschiedene Randbedingungen (Investitionshöhen für verschiedene Technologien, Energiepreise, Wetter, Emissionsfaktoren von Energiequellen, etc.). Um deren jeweiligen Einfluss auf das Optimierungsergebnis zu bestimmen, wurde eine zweistufige Sensitivitätsanalyse durchgeführt. Hierzu wurde im ersten Schritt die screeningbasierte Morris-Methode [38] umgesetzt, um alle potenziell einflussreichen Parameter zu identifizieren. Anschließend wurden die Einflüsse dieser Parameter mit der varianzbasierten Sobol-Methode [39] tiefergehend untersucht.

Die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse werden in Abbildung 21 gezeigt, wobei die Effekte mit den größten Einflüssen dargestellt sind. Die Ergebnisse zeigen, dass der im Modell angesetzte Kalkulationszinssatz (als Teil der ökonomischen Bewertung der Sanierungsmaßnahmen), Preise und Emissionsfaktoren möglicher Energieträger, technische Spezifikationen möglicher neuer Anlagen (z. B. Effizienz) sowie der Nutzstrombedarf (durch Gerätenutzung und innere Beleuchtung) eines Gebäudes den größten Einfluss auf die Ergebnisse haben.

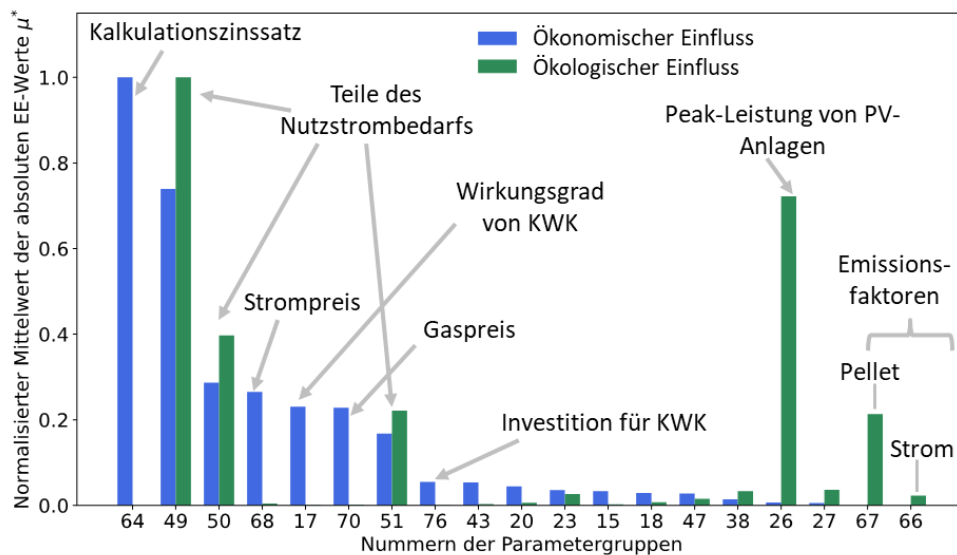


Abbildung 21: Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse.

Die Ergebnisse dieser Analysen konnten auf der internationalen Forschungskonferenz IBPSA Building Simulation vorgestellt, veröffentlicht und mit der Community diskutiert werden [40].

3.4.1.3 Optimierte Modernisierungsentscheidungen typischer Gebäude

Das Modell bietet die Möglichkeit der Anwendung auf typische deutsche Wohn- und Nichtwohngebäude. Im Folgenden werden zunächst beispielhaft der Fahrplan und die Maßnahmen für ein typisches Bürogebäude des Baujahres 1980 gezeigt. Danach werden zusammenfassende Analysen der Modellanwendung auf verschiedene Gebäudetypen gezeigt.

In Abbildung 22 sind die installierten Anlagen der jeweiligen Jahre des Fahrplans und deren Leistung sowie die Dämmungsmaßnahmen über der Zeit aufgetragen. Abbildung 23 enthält die für diese Energiesysteme notwendigen jährlichen Investitionen sowie den Verlauf der Emissionen und den prozentualen Anteil an den ursprünglichen Emissionen des Bestandsgebäudes. Investitionen in der Zukunft werden mittels der Kapitalwertmethode abgezinst. In dieser Anwendung wurden als Nebenbedingungen Emissionsziele gesetzt, die mit den Maßnahmen eingehalten werden müssen und auf den Zielen für den deutschen Gebäudebestand beruhen. Der Fahrplan enthält hohe Anfangsinvestitionen für Anlagentechnik und Fenstertausch. Der bestehende Gaskessel kann zunächst weiterverwendet werden und wird durch ein BHKW ergänzt. Durch den Einsatz eines Heizstabs, eines Pelletkessels und einer PV-Anlage sowie dem Austausch der Fenster kann das Emissionsziel im Jahr 2030 erreicht werden. Zur Erreichung des Emissionsziels im Jahr 2040 sind weitere Modernisierungen erforderlich. Hierzu wird die Wärmeversorgung teilweise elektrifiziert und eine Geothermie-Wärmepumpe gekauft. Um den zusätzlichen Strombedarf für die Wärmebereitstellung möglichst aus der PV-Anlage zu decken, wird zu diesem Zeitpunkt ebenfalls eine Batterie angeschafft.

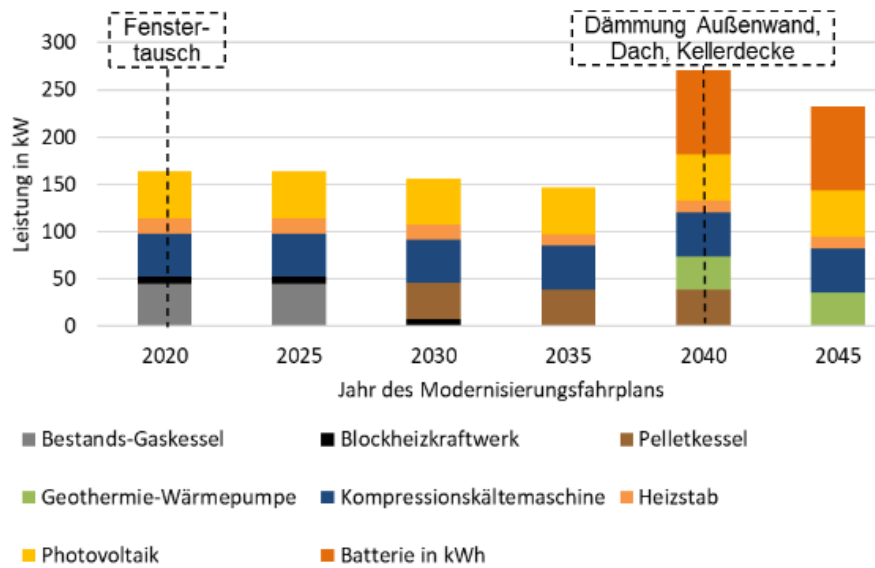


Abbildung 22: Energiesystem des Modernisierungsfahrplans

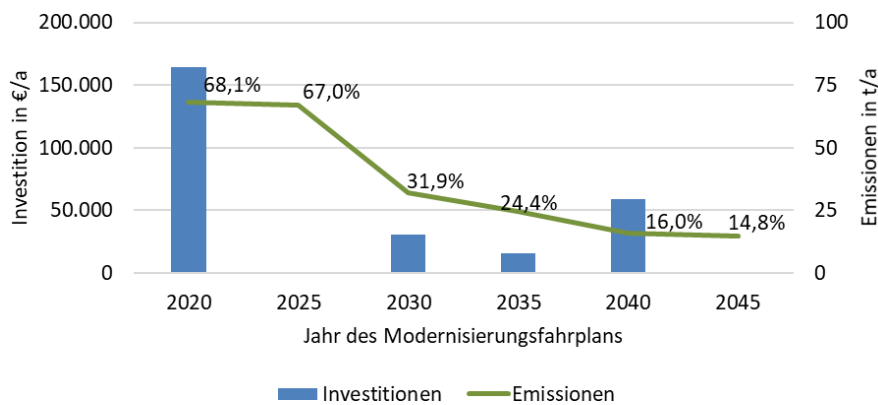


Abbildung 23: Investitionen und Emissionen des berechneten Modernisierungsfahrplans

Im Folgenden werden weitere Ergebnisse aus der Anwendung des beschriebenen Optimierungsmodells zusammengefasst. Als Fallbeispiele dienen sogenannte Typgebäude, die stellvertretend für eine bestimmte Nutzung, Baualtersklasse und weitere Charakteristika stehen. Auf Basis dieser typischen Gebäude lassen sich Technologietrends für die einzelnen Typen und Empfehlungen ableiten. In den vorgestellten Ergebnissen werden keinerlei Förderungen oder Subventionen betrachtet.

Abbildung 24 zeigt die modellbasiert berechneten Spannweiten der CO₂-Vermeidungskosten für einen Zeitraum von 2020 bis 2050 für die vier untersuchten Gebäudetypen. Spannweiten ergeben sich durch die Betrachtung unterschiedlicher Baualtersklassen. Es sind Vermeidungskosten für unterschiedliche Emissionseinsparungen dargestellt, die gegenüber rein ökonomisch motivierten Investitionsentscheidungen berechnet wurden.



Abbildung 24: CO₂-Vermeidungskosten der Modernisierung unterschiedlicher Gebäudetypen.

In allen Gebäudetypen zeigt sich, dass die Vermeidungskosten weitestgehend linear bis zu einer Emissionseinsparung von ca. 51 - 75 % verlaufen. Bei weiterer notwendiger Einsparung steigen die Vermeidungskosten exponentiell an. Es zeigt sich außerdem, dass die Kosten des Gebäudeenergiesystems für eine maximale Emissionseinsparung bis zu einem Faktor von zehn höher liegen können als die Kosten bei rein ökonomisch motivierten Investitionsentscheidungen. Zusätzlich muss beachtet werden, dass eine vollständige Emissionseinsparung nicht nur vom Gebäudeenergiesystem selbst abhängt, sondern auch von den Emissionen des öffentlichen Stromnetzes. Dies ist begründet in der begrenzten Fläche zur Nutzung des Sonneneintrags auf Gebäudedächern durch Solarthermie oder Photovoltaik, durch die selten eine autarke Versorgung realisiert werden kann. Dies bedeutet, dass eine schnellere Transformation der Energiewirtschaft zu erneuerbaren Energien auch die Emissionseinsparungen im Gebäudereich positiv beeinflussen wird. In den untersuchten typischen Wohngebäuden sind Einsparungen von bis zu 95 % der jährlichen CO₂-Emissionen möglich, in den Nichtwohngebäuden, vor allem auf Grund des höheren Strombedarfs, maximal 75 %.

3.4.1.4 Handwerkskapazitäten als Nadelöhr der Gebäudeenergieende

Verschiedene Studien [41, 42] zeigen, dass die Kapazitäten des Handwerks zur Umsetzung von Modernisierungsmaßnahmen aktuell bereits stark ausgelastet sind und sich dieser Zustand zukünftig verschärfen wird. Daher ist davon auszugehen, dass sich die Kapazität des Handwerks limitierend auf die Geschwindigkeit der Gebäudeenergieende auswirken wird. In der Literatur lassen sich allerdings nur vereinzelt und nicht für alle relevanten Modernisierungsmaßnahmen übergreifend Daten finden, welche eine Quantifizierung des Effekts erlauben. Aufgrund dessen wurden im Rahmen des AP 4.1 Experteninterviews zur Ermittlung von Zeitaufwänden, die für Modernisierungsmaßnahmen notwendig

sind, durchgeführt. Diese Zeitangaben wurden zum einen analysiert und zum anderen in Berechnungsmodelle von Modul II integriert. Durch diese Integration konnten bspw. im Optimierungsmodell zur Ermittlung von Modernisierungsstrategien begrenzte Handwerkskapazitäten berücksichtigt werden.

Für alle relevanten Maßnahmen wurde ein Interviewleitfaden erstellt und eine Übersicht zu Firmen erstellt, mit welchen Interviews geführt werden können. Zusätzlich wurden die Interviewleitfäden in eine Mailabfrage sowie einen digitalen Fragebogen überführt, um weitere Abfrageformate zu nutzen. Insgesamt konnten so Interviews mit insgesamt 90 Handwerksunternehmen geführt werden. Die Mittelwerte und 95 %-Konfidenzintervalle des Zeitaufwands für die Modernisierungsmaßnahmen sind in Abbildung 26 dargestellt. Die Ergebnisse zeigen hohe Übereinstimmungen der Befragten bei den Zeiten zur Installation und Deinstallation von Anlagen, die seit vielen Jahren eingesetzt werden (Gaskessel, Pelletkessel). Bei neueren Anlagen hingegen (z. B. Wärmepumpen) unterscheiden sich die Zeitangaben der Expert:Innen etwas mehr, was auf den unterschiedlichen Erfahrungsstand der Firmen zurückzuführen sein kann. Die Daten wurden in das Optimierungsmodell für Modernisierungsfahrpläne (AP 4.5) integriert und Analysen zu beschränkten Handwerkskapazitäten vorgenommen. Alle aufgenommenen Daten der Interviews wurden veröffentlicht und damit anderen Forschenden zur Verfügung gestellt. Ein peer-reviewed Artikel hierzu wurde im Magazin „Nature Scientific Data“ veröffentlicht [5].

Mit Hilfe der Daten aus den Handwerksinterviews konnten Analysen zur Veränderung der Fahrpläne bei begrenzten Handwerkskapazitäten durchgeführt werden, welche in Abbildung 25 für ein typisches Einfamilienhaus dargestellt sind. Der obere Teil der Abbildung zeigt, dass durch die Begrenzung der Handwerkskapazitäten ein weitestgehend linearer Anstieg der totalen Kosten eines Fahrplans sowie ein Anstieg der kumulierten Emissionen entsteht. Im mittleren Teil der Abbildung werden die installierten Leistungen der Wärme- und Stromerzeugungsanlagen gezeigt. Hier ist zu beobachten, dass mit fehlenden Handwerkskapazitäten fossile gasbasierte Anlagen länger genutzt werden und weniger Solaranlagen und Wärmespeicher installiert werden. Im unteren Teil der Abbildung wird der flächengewichtete U-Wert der Fahrpläne gezeigt und damit die realisierten Dämmmaßnahmen. Hier zeigt sich, dass ein mittleres Dämmniveau auch bei begrenzten Kapazitäten umgesetzt wird, um den Einsatz einer Wärmepumpe zu ermöglichen. Diese Ergebnisse konnten bereits in einem peer-reviewed Artikel [43] veröffentlicht werden, welchem weitere Details entnommen werden können.

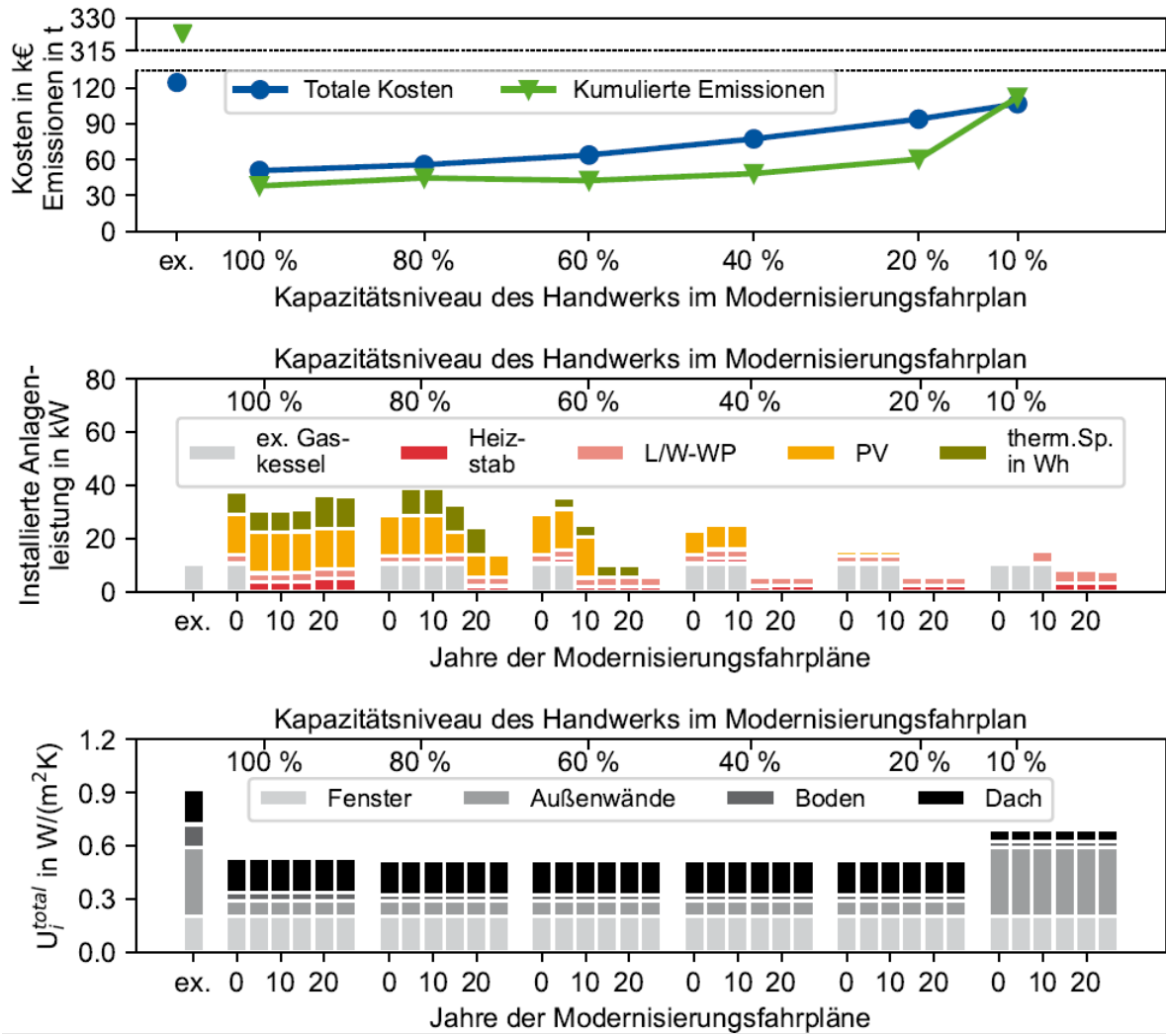


Abbildung 25: Ergebnisse für Modernisierungsfahrpläne bei beschränkten Handwerkskapazitäten. Das Kapazitätsniveau beschreibt hier verfügbare Kapazitäten im Vergleich zu einem frei optimierten Szenario.

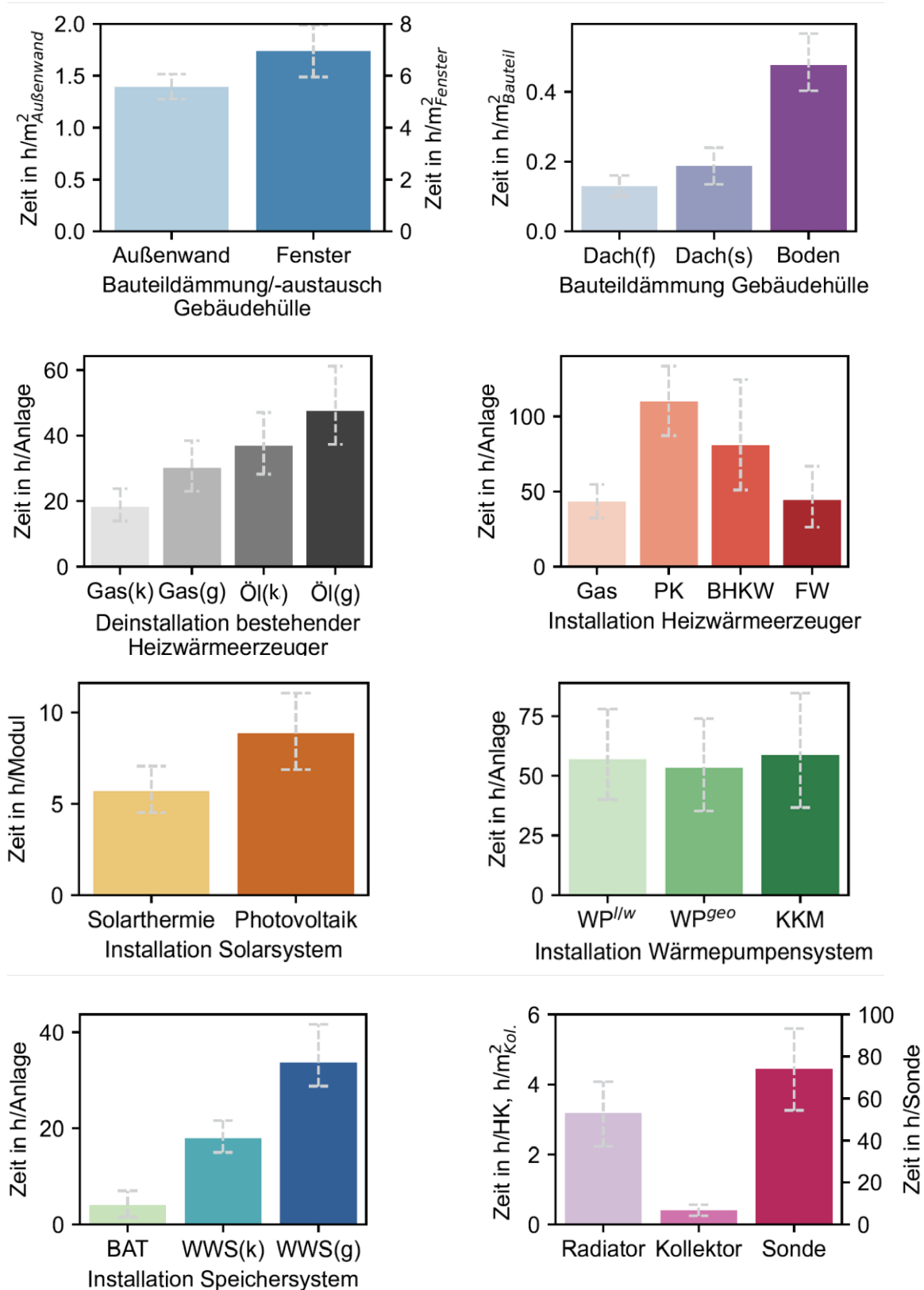


Abbildung 26: Realisierungszeiten von Modernisierungsmaßnahmen basierend auf den geführten Handwerksinterviews. Abkürzungen: flach (f), steil (s), klein (k), groß (g), Pelletkessel (PK), Blockheizkraftwerk (BHKW), Fernwärme (FW), Luft-Wasser-Wärmepumpe (WPI/w), Geothermie-Wärmepumpe (WP geo), Kompressionskältemaschine (KKM), Batterie (BAT), Warmwasserspeicher (WWS).

3.4.2 AP 4.2: Neubau als Innovationstreiber

Obwohl die Hauptaufgabe der Energiewende im Gebäudebereich in der zeitnahen Sanierung der Bestandsgebäude liegt, sind „Highlight-Projekte“ im Neubaubereich wichtig. Hier treten weniger limitierende Bedingungen auf und so können der Einsatz von innovativen Technologien aus dem Effizienzbereich (Gebäudehülle und Anlagentechnik für die Beheizung, Belüftung, Kühlung und Beleuchtung) sowie die Nutzung von erneuerbaren Energien einfacher in Demonstrationsgebäuden getestet und neue hocheffiziente Gebäudestandards entwickelt werden. Viele dieser innovativen Technologien können in einem zweiten Schritt auch bei Sanierungen eingesetzt werden. In diesem AP lag deshalb der Fokus auf der Identifikation und Analyse von neuen bzw. weiterentwickelten Technologien und deren Anwendung in Forschungsprojekten im Gebäudebereich. Eine weitere Aufgabe in diesem Arbeitspaket war die Analyse von kostengünstigen Lösungen. Das Arbeitspaket wurde hauptsächlich vom IBP bearbeitet und durch die RWTH begleitend unterstützt.

Ziele des Arbeitspakets

- Identifikation und Analyse von neuen bzw. weiterentwickelten Technologien und deren Anwendung in Gebäuden aus den Forschungsprojekten
- Identifikation von kostengünstigen Lösungen
- Quantifizierung des Potenzials der Einspareffekte an Energie und klimaschädlicher Emissionen im Neubaubereich

Methoden

- Literaturrecherche zu innovativen Technologien im Gebäudebereich
- Zusammenstellung von Informationen aus der Literatur zu Kosten im Gebäudebereich, zur Entwicklung der Bau- und Energiekosten sowie zu Ergebnissen aus anderen Forschungsprogrammen mit dem Themenschwerpunkt „kostengünstig“
- Erstellung und Auswertung von Fragebögen zu innovativen Technologien und kostengünstigen Lösungen im Gebäudebereich der Forschungsinitiative EWB
- Auswertung der Abschlussberichte von Projekten, die sich mit innovativen Technologien befassen
- Durchführung einer Vortragsreihe mit anschließender Diskussion zum Thema innovative Technologien im Rahmen des Projektetreffens im November 2022.
- Durchführung von Kurzinterviews mit 19 Projektnehmenden zum kostengünstigen Ansatz ihrer Forschungsprojekte

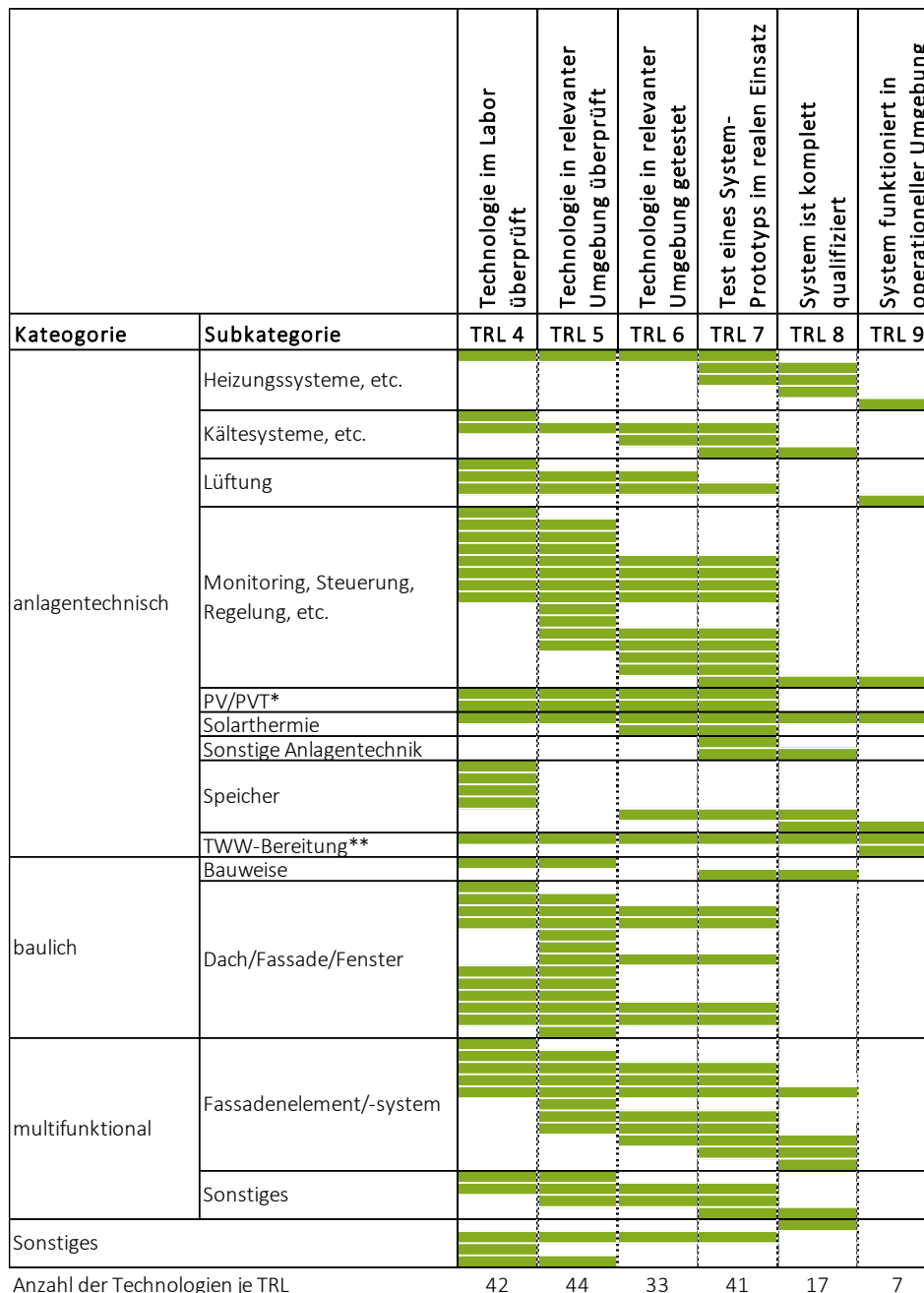
Ergebnisse:

- Die innovativen Technologien der EWB-Projekte decken ein breites Spektrum an Themenfeldern ab. Der größte Anteil der erforschten Technologien kann dem Bereich der Anlagentechnik zugeordnet werden.
- Bei der Sammlung und Analyse der Stärken, Schwächen, Chancen und Hemmnisse der innovativen Technologien zeigte sich, dass diese je nach Technologie stark variieren können. Bei den Stärken und Chancen wurden u. a. Faktoren in den Bereichen Energie und Ökologie festgehalten. Bei den Schwächen und Hemmnissen wurden u. a. Faktoren in den Bereichen Kosten und Kommunikation genannt.
- Aus den Ergebnissen anderer Forschungsprogramme wird deutlich, dass kostengünstiges Bauen und Betreiben von Gebäuden auf verschiedene Weise realisiert werden können. Hauptsächlich von Bedeutung erscheint, dass die Senkung der Bau- und Betriebskosten thematisiert wird. Zur Definition des kostengünstigen Bauens und Betriebens fehlen Benchmarks, insbesondere im Bereich der Nichtwohngebäude.
- Bei der Querauswertung der EWB-Projekte wurde deutlich, dass insgesamt eine Vielfalt an verschiedenen kosteneffizienten Ansätzen im Gebäudesektor erforscht werden. Der größte Anteil der zugehörigen Projekte liegt im Themenbereich „Monitoring, Steuerung, Messtechnik und Betrieb“ bzw. zielt auf die Lebenszyklusphase Betrieb inkl. Instandhaltung ab.
- Voraussetzung für einen signifikanten Beitrag der ausgewerteten Technologien und Ansätze zur Klimaneutralität ist die erfolgreiche Umsetzung und breite Anwendung.

3.4.2.1 Querauswertung innovative Technologien

Insgesamt wurden 147 Projekte in der Forschungsinitiative identifiziert, die sich mit innovativen Gebäudetechnologien beschäftigen. Die Querauswertung konzentriert sich auf das Gesamtbild der EWB-Forschungslandschaft und analysiert Themen wie Technologieeinordnung, Forschungsaktivitäten, Reifegrad, Ziele, Anwendungsfelder sowie Stärken, Schwächen, Chancen und Hemmnisse der Technologien. Aufgrund der unterschiedlichen Projektlaufzeiten wurde eine zweistufige Bewertungsmethodik angewandt, bei der Abschlussberichte, Beschreibungen aus der EnArgus-Datenbank und Daten aus zwei Umfragen der Begleitforschung verwendet wurden. Erste Ergebnisse der Querauswertung wurden als Eingangsvortrag der Vortragsreihe „Innovative Technologien“ beim Projekttreffen im November 2022 vorgestellt. In der offenen Diskussionsrunde der Vortragsreihe wurden die Stärken, Schwächen, Hemmnisse und Chancen von innovativen Technologien in der Expertenrunde gesammelt. Die Querauswertung wurde im August 2023 fertiggestellt und spiegelt den Stand der Forschungsprojekte zu diesem Zeitpunkt wider. Die Ergebnisse der Querauswertung werden folgend kurz zusammengefasst.

- Die Anzahl der erforschten Technologien beträgt insgesamt 168, da sich einige Forschungsprojekte mit mehreren Technologien befassen. Die EWB-Projekte beschäftigen sich mit einer großen Bandbreite an innovativen Technologien im Gebäudebereich. Der größte Anteil (61 %) dieser innovativen Technologien kann dem Bereich der Anlagentechnik zugeordnet werden, gefolgt vom baulichen (20 %) und vom multifunktionalen Bereich (16 %).
- Die Forschungsaktivitäten der EWB-Projekte zu innovativen Technologien lassen sich in drei Bereiche unterteilen: das Entwickeln, Bewerten und Einsetzen bzw. Anwenden der Technologie. Schwerpunktmäßig beschäftigen sich die EWB-Projekte mit der Entwicklung.
- Das Technology Readiness Level (TRL) einiger innovativer Technologien der EWB-Projekte wurde ebenfalls ausgewertet. Die häufigsten Reifegrade, die in den EWB-Forschungsprojekten bereits durchlaufen wurden oder noch durchlaufen werden sollen, sind TRL 5 (Technologie in relevanter Umgebung überprüft) und TRL 4 (Technologie im Labor überprüft). Die Mehrheit der Technologien durchläuft während eines Forschungsprojekts mehrere Reifegrade. Abbildung 27 zeigt die angegebenen TRLs innovativer Technologien, die in EWB-Projekten erforscht werden. Jede Technologie wird in einer eigenen Zeile dargestellt. Die erreichten oder geplanten TRLs sind grün markiert.
- Um die Motivation und den Hintergrund zur Untersuchung der Technologien zu erfassen, wurden die Ziele der Innovation ausgewertet. Die am häufigsten genannten Innovationsziele sind Effizienzsteigerung, Betriebsoptimierung und Energieeinsparung.
- Vor dem Hintergrund, dass im Neubaubereich weniger einschränkende Bedingungen vorliegen und somit der Einsatz innovativer Technologien leichter pilothaft erprobt werden kann, sollte ursprünglich die Übertragbarkeit innovativer Technologien auf Sanierungsprojekte bewertet werden. Die Auswertung des ersten Fragebogens hat jedoch gezeigt, dass die EWB-Projekte bereits sehr breit in Bezug auf den Einsatz und die Anwendungsbereiche der Technologien (Neubau, Sanierung und Bestand bzw. Wohngebäude und Nichtwohngebäude) denken.
- Faktoren, die den Fortschritt der innovativen Technologien beeinflussen, wurden anhand einer SWOT-Analyse (Stärken, Schwächen, Chancen und Hemmnisse) aus den Abschlussberichten und im Rahmen eines Workshops mit EWB-Projekten gesammelt. Die zusammengetragenen Aspekte variieren stark in Abhängigkeit der untersuchten Technologie.



* Photovoltaik / Photovoltaik kombiniert mit Solarthermie-Kollektoren

**Trinkwarmwasserbereitung

Abbildung 27: Spanne der Technology Readiness Levels innovativer Technologien der EWB-Forschungsprojekte während der Projektlaufzeit. Quelle: eigene Darstellung.

Insgesamt zeigt die Querauswertung, dass die innovativen Technologien der EWB-Projekte ein breites Spektrum an Themenfeldern abdecken und damit vielversprechende Möglichkeiten bieten, einen Beitrag zum Ziel der Klimaneutralität im Gebäudesektor zu leisten. Voraussetzung dafür ist die erfolgreiche Umsetzung und breite Anwendung der Technologien. Im Anhang der Veröffentlichung [7] ist eine Gesamtliste der ausgewerteten Gebäudetechnologien gegeben, um die Suche nach innovativen Technologien für den projektübergreifenden Wissensaustausch und weitere Anwendungen zu erleichtern.

Die Querauswertung zu den innovativen Technologien wurde zusätzlich als Eingangspräsentation zum geführten Messerundgang des EWB-Kongresses auf der Messe Light and Building in Frankfurt 2024 genutzt.

3.4.2.2 Querauswertung kostengünstige Technologien

Ein weiterer Schwerpunkt des AP ist die Analyse von kostengünstigen Lösungen, die vor allem für Wohngebäude aber auch für öffentliche Gebäude wichtig sind. Im Rahmen der zweiten Querauswertung wurden 76 Projekte mit kostengünstigen oder kostensparenden Ansätzen identifiziert. Daten zu den Projekten wurden anhand von Fragebögen und Kurzinterviews gesammelt. Neben der Querauswertung der EWB-Projekte wurden in der Veröffentlichung [8] Informationen aus der Literatur zu Kosten im Gebäudebereich, zur Entwicklung der Bau- und Energiekosten sowie Erkenntnisse aus anderen Förderprogrammen festgehalten. Die Ergebnisse der Literaturrecherche und der Querauswertung zu kostengünstigen Lösungen werden folgend kurz zusammengefasst.

Die Bau- und Energiekosten beeinflussen die Bezahlbarkeit bzw. Wirtschaftlichkeit von Wohn- und Nichtwohngebäuden. Eine Vielzahl an Handlungsfelder und Maßnahmen zur Begrenzung der Baukosten werden in der Literatur (z. B. [44], [45] und [46]) identifiziert, darunter die Verbreitung von Standardisierung bzw. seriellem und modularem Bauen und die Förderung von Fachkräfte- und Kompetenzaufbau sowie der breitenwirksame Wissens- und Erkenntnistransfer. Die Darstellung der Entwicklung der Bau- und Energiepreise seit dem Basisjahr 2000 zeigt, dass diese im Vergleich zum allgemeinen Verbraucherpreisindex (VPI) stärker gestiegen sind. Bei den Baukosten ist ein besonders hoher Anstieg in der Kostengruppe der technischen Anlagen (KG 400) zu verzeichnen (siehe Abbildung 28).

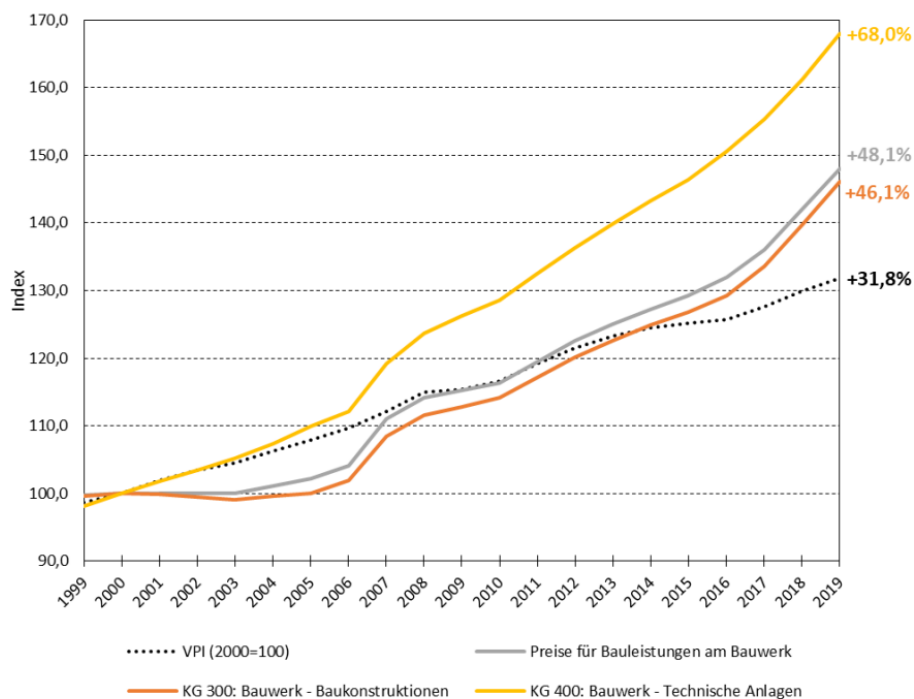


Abbildung 28: Darstellung der Indexreihen „KG 300: Bauwerk – Baukonstruktionen“ und „KG 400: Bauwerk – Technische Anlagen“ im Vergleich zum Verbraucherpreisindex VPI. Quelle: [47].

Nach [46] erscheint eine signifikante Senkung der Baukosten unter den gegebenen Rahmenbedingungen nicht realisierbar. Ziel ist vielmehr, weitere Kostensteigerungen zu verhindern. Dies kann nicht durch Einzelmaßnahmen erreicht werden, sondern durch ganzheitliche Lösungsansätze, die zum großen Teil bereits bekannt sind. Die Herausforderung besteht darin, diese Maßnahmen flächendeckend in der Planungs- und Baupraxis umzusetzen. Zukünftige Prognosen zur Entwicklung der Primärenergiepreisträger fallen unterschiedlich aus, Empfehlungen in den Rahmendaten der Treibhausgas-Projektionen 2024 für Deutschland [48] gehen von einem Abwärtstrend aus. Die Verbraucherpreise der ausgewerteten Energieträger Strom, Gas, Heizöl und feste Brennstoffe sind seit 2020 deutlich gestiegen, auch im Vergleich zum allgemeinen Durchschnitt (siehe Abbildung 29).

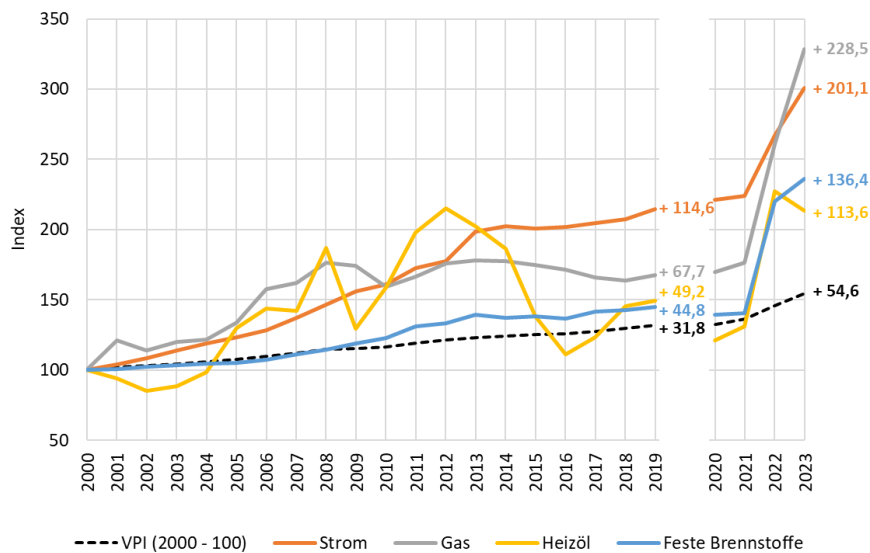


Abbildung 29: Darstellung der Indexreihen Strom, Gas, Heizöl und feste Brennstoffe im Vergleich zum Verbraucherpreisindex VPI. Quelle: eigene Darstellung mit Daten von [49].

Aus den Ergebnissen des Förderprogramms Variowohnungen [50] wird deutlich, dass eine Kostensenkung der Bau- und Betriebskosten bei den einzelnen Modellprojekten auf verschiedene Weise realisiert werden konnte. Es scheint daher von Bedeutung, die Senkung der Bau- und Betriebskosten bei Bauprojekten zu thematisieren und die verschiedenen Möglichkeiten zu untersuchen, um eine für das jeweilige Projekt passende Lösungen auszuwählen. Um kostengünstiges Bauen und Betreiben stärker zu thematisieren sind Benchmarks notwendig. Das kürzlich ausgerufenen Förderprogramm „Klimafreundlicher Neubau im Niedrigpreissegment“ vom BMWSB bietet einen ersten Ansatz zur Definition solcher Benchmarks im Bereich der Bau- und Energiekosten von Wohngebäuden. Weitere Ansätze, insbesondere im Bereich der öffentlichen Nichtwohngebäude wie Schulen, Kindertagesstätten etc. fehlen und sollten entwickelt werden, um die Umsetzung kosteneffizienten Bauens und Betriebs stärker zu fördern.

Bei der Querauswertung der EWB-Projekte wurde deutlich, dass eine Vielfalt an verschiedenen kosteneffizienten Ansätzen im Gebäudesektor erforscht werden. Insgesamt konnten 76 Projekte mit kostengünstigen oder kostensparenden Ansätzen identifiziert und analysiert werden. Der größte Anteil der Projekte liegt im Bereich „Monitoring, Steuerung, Messtechnik und Betrieb“ gefolgt vom Bereich der „Wärme- und Kälteversorgung“ (siehe Abbildung 30). Bei einigen Projekten steht die Erzielung eines Kostenvorteils im Vordergrund, bei anderen dagegen ist der Kostenvorteil ein Nebenprodukt der Energieeinsparung bzw. der Erzielung einer höheren Energieeffizienz. Anhand der durchgeführten Kurzinterviews mit Projektnehmenden wurden die verschiedenen Schwerpunkte der Kosten im Gebäudelebenszyklus ausgewertet. Hier gab die größte Anzahl der befragten Projektnehmenden an, kosteneffiziente Ansätze im Bereich der Betriebs- bzw. Instandhaltungskosten zu erforschen, gefolgt von den Herstellungs-, Errichtungs- bzw. Investitionskosten sowie den sonstigen Kosten.

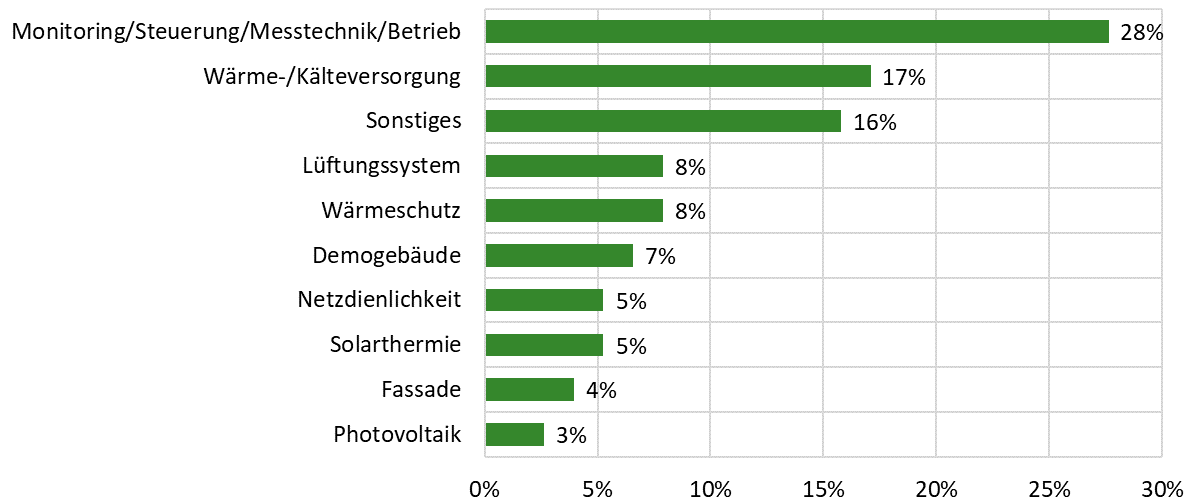


Abbildung 30: Zuordnung der kosteneffizienten Lösungen der EWB-Projekte in unterschiedliche Themenfelder mit jeweiligem Anteil. Insgesamt gaben 76 Projekte ann kostengünstige oder kostensparende Lösungen zu beinhalten. Quelle: eigene Darstellung.

3.4.3 AP 4.3: Smarter Gebäudebetrieb

Durch die Planung und korrekte Umsetzung eines energieeffizienten Gebäudes sind die Grundlagen für einen niedrigen Energieverbrauch gelegt. Allerdings weisen solche Gebäude oftmals einen höheren Energieverbrauch auf als ursprünglich berechnet. Die Gründe dafür sind vielfältig. Neben abweichendem Nutzer:Innen-Verhalten können es Abweichungen in den Regelungen oder defekte Teile der Anlagentechnik sein. Eine detaillierte Betriebsüberwachung und Betriebsoptimierung ist deshalb ein wichtiger Baustein für ein energieeffizientes Gebäude. Die Regelung muss auf die Nutzung abgestimmt sein. National und international erhofft man sich hohe Optimierungspotenziale durch den Einsatz von smarten Technologien bzw. Regelungen, die auch in der Weiterentwicklung der Gebäudeeffizienzrichtlinie (EPBD) verankert sind, und für die derzeit der Smart Readiness Indicator (SRI) innerhalb einer EU-Studie entwickelt wird. In diesem AP sollten basierend auf den geförderten Projekten und weiteren Recherchen die energetischen Potenziale von smarten Gebäudetechnologien und -regelungen analysiert werden. Zusätzlich sollten Demonstrationsgebäude hinsichtlich der Smart Readiness analysiert und bewertet werden. Darüber hinaus wurde die Robustheit von Gebäudebetriebsweisen gegenüber Nutzereinfluss und weiteren Randbedingungen untersucht. Ein weiterer Schwerpunkt lag auf der Ermittlung und Bereitstellung von Lastprofilen für unterschiedliche Gebäudetypen und Nutzungsarten in Zusammenarbeit mit BF-Modul I. Diese werden als Input oder Validierung von in Forschungsprojekten entwickelten Berechnungsmodellen benötigt.

Die Leitung des APs erfolgte durch Fraunhofer IBP, das auch die Querauswertungen zu smarten Technologien und die Testanwendung des EU-Smart Readiness Indicators durchführte. Die Untersuchungen zur Robustheit von Gebäudebetriebsweisen erfolgte durch RWTH EBC. Die Arbeiten zur Bereitstellung von Lastprofilen wurden vom Fraunhofer IBP geleistet. Die ursprünglich vorgesehene Arbeitszeit für Fraunhofer ISI für dieses AP wurde im AP 3 eingesetzt.

Ziele des Arbeitspakets

- Zusammenstellung der Betriebsüberwachungs- und Optimierungsmethoden in den Gebäudeprojekten
- Ermittlung der energetischen Potenziale von smarten Gebäudetechnologien und -regelungen
- Bewertung von Demonstrationsgebäuden hinsichtlich Smart Readiness
- Bereitstellung von Lastprofilen unterschiedlicher Gebäudetypen zur Nutzung in weiteren Forschungsprojekten
- Quantifizierung des Potenzials der Einspareffekte an Energie und klimaschädlicher Emissionen im Gebäudebetrieb
- Untersuchung robuster Betriebsweisen von Gebäuden im Hinblick auf mögliche Unsicherheitsfaktoren im Gebäudebetrieb

Methoden

- Literaturrecherche zu smarten (Regel-)Technologien und Betriebsoptimierungsstrategien
- Entwicklung eines Expert:Innen-Fragebogens zu digitalen Technologien für den Gebäudebetrieb, Durchführung der Befragung und statistische Analyse der Antworten
- Vergleichende Auswertung der Vorhaben (Cluster, BF-Fragebogen, Expert:Innen-Fragebogen) hinsichtlich des Einsatzes smarterer Technologien
- Definition und Prozessbeschreibung der Selektierbarkeit von Lastprofilen aus Monitoringdaten innerhalb der EWB-Monitoringdatenbank
- Literaturrecherche zu Unsicherheitsfaktoren und Ansätzen zur Erhöhung der Robustheit im Gebäudebetrieb
- Querauswertung von robusten Betriebsansätzen in den Forschungsprojekten
- Analyse der von der EU vorgeschlagenen Bewertungsmethode zur Ermittlung des Intelligenzfähigkeitsindikators, dem so genannten Smart Readiness Indicator
- Anwendung und Erprobung des SRI-Bewertungs-Tools (entwickelt im Auftrag der EU-Kommission) zur Bewertung von mehreren Demonstrationsgebäuden hinsichtlich Smart Readiness
- Identifikation der zur SRI-Bewertung geeigneter Forschungsprojekte anhand des Projektclusters und modulübergreifenden Befragung
- Schriftliche Informationsabfragen und Abstimmungen mit den Projektnehmern hinsichtlich Eingaben im SRI-Bewertungstool.

Ergebnisse:

- Innerhalb der EWB-Vorhaben mit dem Forschungsschwerpunkt Gebäude werden zunehmend smarte Technologien für die Betriebsoptimierung eingesetzt (aktuell 47 % der Vorhaben, die sich mit Betriebsoptimierung beschäftigen). Modellprädiktive (MPC) und adaptive Regelkonzepte stehen dabei im Vordergrund. Die Optimierungsziele Energieeinsparung und Erhöhung der Wirtschaftlichkeit stehen dabei im Fokus. Die Quantifizierbarkeit der Energieeinspareffekte durch den Einsatz smarterer Technologien wird in den meisten Vorhaben methodisch betrachtet, Angaben zu tatsächlichen erzielten oder erzielbaren Einsparungen fehlen jedoch mehrheitlich.
- Eine Methode zur Identifikation und Abfrage von Messdaten, die für die Darstellung von Lastprofilen geeignet sind, wurde entwickelt und im Leitfaden Monitoring integriert. Insbesondere die Entwicklung eines Energieflussschemas innerhalb von Forschungsvorhaben wird vorgeschlagen, um eine verständliche und konsistente Datenbasis für Dritte bereitstellen zu können. In diesem Zusammenhang werden Mindestanforderungen für die gebäudebezogenen Metadaten zusammengefasst.
- Die Unsicherheitsfaktoren im Gebäudebetrieb liegen vor allem im variierenden Nutzer:Innen-Verhalten, in der Fehleranfälligkeit technischer Komponenten und in der Vorhersagegüte der Algorithmen für die prädiktive Regelung. Mögliche Lösungen zur Berücksichtigung dieser Faktoren und zur Erhöhung der Robustheit des Gebäudebetriebs umfassen die Nutzung datenbasierter Modellierungsansätze zur präzisen Erfassung des Nutzer:Innen-Verhaltens, den Einsatz von Low-Tech-Ansätzen wie natürliche Belüftung und einfache Wärmerückgewinnung, das Monitoring von Energiesystemen zur Erfassung ausreichender Daten für Prognosealgorithmen und die Auswahl geeigneter datenbasierter Vorhersagemodelle.

-
- Mit dem SRI-Bewertungstool ist es nicht kompliziert, typische Standardkonzepte und -technologien im Bereich der Anlagentechnik zu bewerten. Es wird aber nur Anlagentechnik bzw. die Steuerung/Regelung bewertet, die bereits vorhanden ist. Anwendungen, bei welchen es sich nur um eine Vorrüstung handelt, werden nicht bewertet.
 - Die SRI-Bewertung von Demonstrationsgebäuden zeigt, dass die überwiegende Anzahl der bewerteten Objekte nur eine niedrige Gesamt-SRI-Punktzahl erreicht, da in vielen Bereichen konventionell gesteuert und geregelt wird. Anhand von Bewertungsergebnissen konnte festgestellt werden, dass es erforderlich ist smarte Anwendungen in nahezu allen technischen Bereichen umzusetzen, um eine hohe SRI-Punktzahl zu erreichen.
 - Die Informationen in einem SRI-Zertifikat sind teilweise unzureichend; eine prägnante Dokumentation über die in dem bewerteten Objekt vorhandene Anlagentechnik, Steuerung und Regelung sowie die bereits installierte Infrastruktur ist wichtig. Des Weiteren sollten Empfehlungen aufgenommen werden, die aufzeigen, an welcher Stelle bzw. in welchem Bereich smarte Anwendungen sinnvoll und mit geringem Aufwand erweitert bzw. nachgerüstet werden könnten.
 - Bei der SRI-Bewertung liegt ein starker Fokus auf der Regelung und der Steuerung von anlagentechnischen Systemen. Ein weiterer Schwerpunkt der SRI-Bewertung liegt in der Bewertung von vorzulegenden Informationen über die Leistung der Systeme. Diese Erwartungen erfordern unter anderem einen flächendeckenden Einsatz von Sensoren und Aktoren sowie deren Anbindung an die Gebäudeautomation, aber auch an Monitoring-Systeme.

3.4.3.1 Smarte Technologien

Der Begriff smarte Gebäudetechnologien ist bis heute nicht klar definiert. Frühere Definitionen betonten die Optimierung von Systemen, Struktur, Dienstleistungen und Management sowie die Verknüpfung derselben in Gebäuden [51]. In den späten 1990er und frühen 2000er Jahren wurden Aspekte, wie die dynamischen Bedürfnisse, die Lebensqualität der Nutzer:Innen und Wechselwirkungen zwischen den Nutzer:Innen und Gebäuden, sowie die Umwelt um das Gebäude in die Definitionen mit einbezogen ([52], [53]). In den vergangenen zehn Jahren haben neuere Definitionen die Digitalisierung und künstliche Intelligenz integriert, um das Potenzial zur Steigerung des Nutzer:Innen-Komforts sowie der Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden und Quartieren voll auszuschöpfen [54], [55]. Im Unterschied zu konventionellen Regelungen in Gebäuden zeichnen sich smarte Regelstrategien dadurch aus, dass diese aus gemessenen Daten im Gebäude mithilfe zentralisierter digitaler Strukturen gewerkeübergreifend selbstständige Entscheidungen an das Gebäudesystem zurückliefern. Darüber hinaus werden zunehmend smarte Technologien eingesetzt, um außerhalb von Gebäuden den steigenden Anteil erneuerbarer Energien in den Stromnetzen intelligent zu regeln [56]. Smart Meter und Smart Meter Gateways sollen dabei durch eine Lastregelung auf der Verbrauchsseite die Netzstabilität und Versorgungssicherheit sicherstellen [57].

Innerhalb der EWB-Vorhaben wurden 95 Projekte mit dem Forschungsschwerpunkt Gebäude querausgewertet, die in der Beantwortung des BF-Fragebogens Angaben zu Betriebsoptimierungen und smarten Technologien gemacht haben. Demnach beschäftigen sich 40 % der Vorhaben mit Betriebsüberwachungs- und Optimierungssystemen (Anzahl 38). Innerhalb dieser Gruppe geben 18 Vorhaben an, smarte Technologien zu entwickeln, zu bewerten oder einzusetzen. Weitere sechs Vorhaben beschäftigen sich nicht mit Betriebsüberwachung, wohl aber mit smarten Technologien. Innerhalb der Gruppe, die sich mit Betriebsüberwachung bzw. Betriebsoptimierung beschäftigen, ist der Anteil „smarter“ Technologien mit 47 % hoch und belegt die zunehmende Wichtigkeit neuer digitalisierter Strategien in diesem Bereich (siehe Abbildung 31).

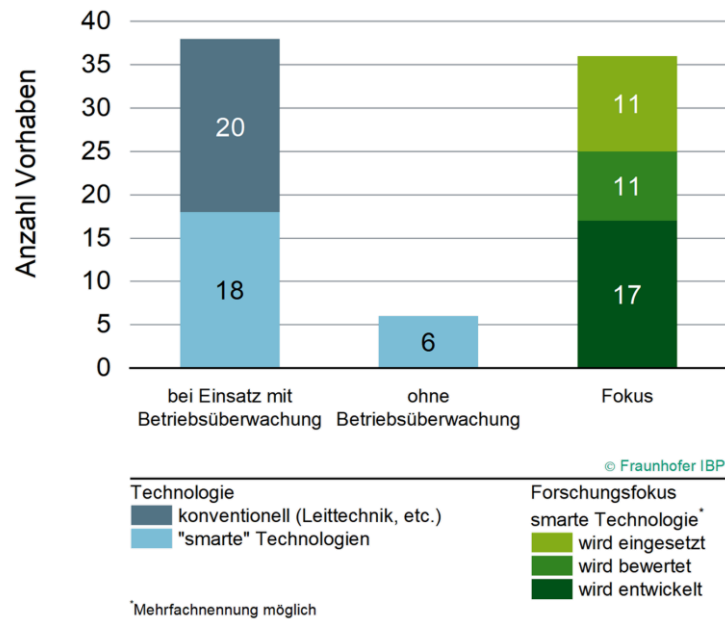


Abbildung 31: Schnittmenge zwischen Betriebsüberwachungssystemen und smarten Technologien innerhalb auswertbarer EWB-Vorhaben, sowie Forschungsfokus in den Vorhaben.

Smarte Technologien im Sinne von intelligenten und vernetzten Optimierungsstrategien umfassen vor allem datengetriebene Modelle, die das zukünftige Verhalten von Energiesystemen mithilfe vergangener oder aus Simulationen generierten Daten beschreiben können. Wesentliche Methoden sind dabei:

Modellbasierte prädiktive Regelung (MPC): Bei der MPC [58] wird ein mathematisches Modell des zu regelnden Systems verwendet, um zukünftige Zustände und Systemverhalten vorherzusagen. Basierend auf diesen Vorhersagen wird eine optimale Regelstrategie entwickelt, die die gewünschten Ziele wie Energieeffizienz, Komfort und Sicherheit erreichen soll. Die MPC berücksichtigt dabei nicht nur den aktuellen Zustand des Systems, sondern auch zukünftige Zustandsänderungen und Einschränkungen.

Die **agentenbasierte Modellierung** [59] ist eine Methode, um das Verhalten und die Interaktion von einzelnen Akteuren oder "Agenten" in einem System zu modellieren. Jeder Agent wird als dezentrale Regelungseinheit betrachtet, die über bestimmte Eigenschaften (z. B. konventionelle Regelung einer Komponente) und Verhalten verfügt und mit weiteren Agenten im System kommunizieren und interagieren. Durch die Interaktion soll im Gesamtsystem die (kosten)effizienteste Betriebsweise ermittelt werden.

Die Methode der **adaptiven Regelung** optimiert mithilfe von Rückkopplungsinformationen das Regelverhalten eines Systems durch kontinuierliche Anpassung unter Berücksichtigung veränderlicher Randbedingungen. Üblicherweise kommen dabei mathematische Modelle des Systems sowie Messdaten zum Einsatz, die dabei Konzepte des maschinellen Lernens, Parameteridentifikation oder adaptive Filterung nutzen.

Hardware-in-the-Loop (HIL) ist eine Methode zur Entwicklung und Validierung von **Hardware**-Systemen. Bei HIL werden reale Komponenten in eine Testumgebung integriert. Durch die Kopplung der realen Komponenten mit einem Simulationssystem wird das Verhalten der restlichen, nicht realen Komponenten simuliert. Die HIL-Testumgebung ermöglicht es, das Verhalten des gesamten Systems unter realistischen Bedingungen zu testen, ohne dass die Hardware bereits vollständig implementiert sein muss. HIL kann sowohl in der Planung als auch im Gebäudebetrieb eingesetzt werden.

Zum besseren Verständnis, welche Methoden für welche Optimierungsziele erforscht werden, wurde in Zusammenarbeit mit dem BF-Modul IV ein spezifischer Expert:Innen-Fragebogen entwickelt. Dieser wurde an diejenigen Verbund- und Teilvorhaben versendet, die smarte Technologien nutzen. Dabei wurde der Fokus auf Gebäude- und Quartiersprojekte erweitert. Von den 139 angefragten Vorhaben (37 Verbundvorhaben und deren 102 Teilvorhaben) liegen 32 Antworten (27 Verbundvorhaben und fünf Teilprojekte) zum Fragebogen vor. Gemäß den Antworten der Verbundvorhaben (Anzahl $n = 27$) findet eine Betriebsoptimierung mehrheitlich innerhalb des Gebäudes statt (15). Bei acht Vorhaben werden sowohl die Gebäudeenergiesysteme als auch angrenzende Netze betrachtet. Ein kleinerer Teil (vier Vorhaben) erforscht darüber hinaus Möglichkeiten zur Teilnahme am Strommarkt.

Die Auswertung zeigt weiterhin, dass sich der überwiegende Teil (Mehrfachnennungen für die Beantwortung möglich) mit Methoden der MPC (11 Vorhaben) beschäftigt (siehe Abbildung 32). Des Weiteren wird die Methode der adaptiven Regelung von acht Vorhaben verfolgt. Hier werden insbesondere einzelne Komponenten des Energiesystems in Gebäuden adressiert. HIL und die agentenbasierte Modellierung werden weniger häufig eingesetzt. Im Bereich der Modellierung werden zu einem großen Teil Werkzeuge der künstlichen Intelligenz (KI) genutzt (neun Vorhaben). Verfahren des maschinellen Lernens, wie beispielsweise für neuronale Netze oder für die Mustererkennung bei Fehlererkennungsverfahren (fault detection and diagnosis) stehen dabei im Vordergrund. Die Auswertung (Abbildung 32) beinhaltet auch die befragten Teilvorhaben, da hier der Einsatz verschiedener Technologien möglich ist.

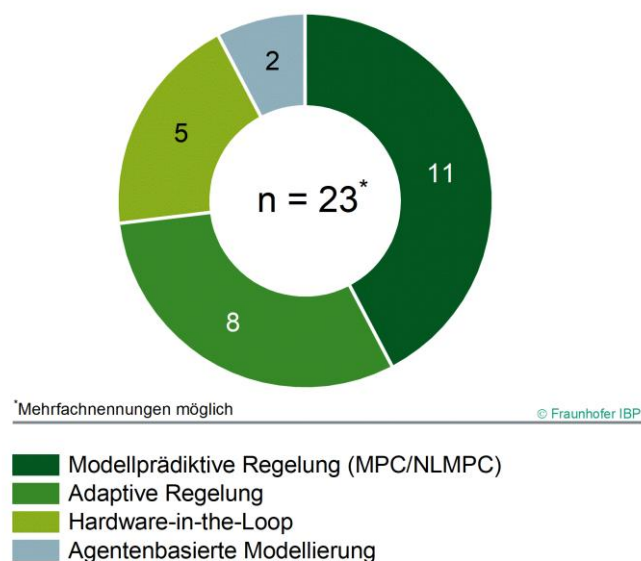


Abbildung 32: Angaben der befragten Teilnehmer:Innen hinsichtlich des Methodeneinsatzes für die Betriebsoptimierung. Quelle: eigene Darstellung.

Sowohl konventionelle als auch intelligente Technologien werden eingesetzt, um die Ziele einer Betriebsoptimierung erreichen zu können. Die Optimierungsziele variieren dabei innerhalb der befragten Vorhaben. Zunächst wurden die teilnehmenden Vorhaben befragt, welche Energieströme im Fokus der Optimierung liegen. In den meisten Vorhaben (25) werden multimodale Systeme mit den Energieströmen Wärme, Kälte und Strom optimiert. Bei einigen Vorhaben werden ausschließlich Strom (1) oder Wärme (4) optimiert. Bei zwei Vorhaben liegt der Fokus auf der Luftverteilung. Darüber hinaus wurden von 27 Vorhaben (ohne Teilvorhaben) die in Abbildung 33 aufgeführten Angaben hinsichtlich der Wichtigkeit der verfolgten Optimierungsziele dokumentiert.

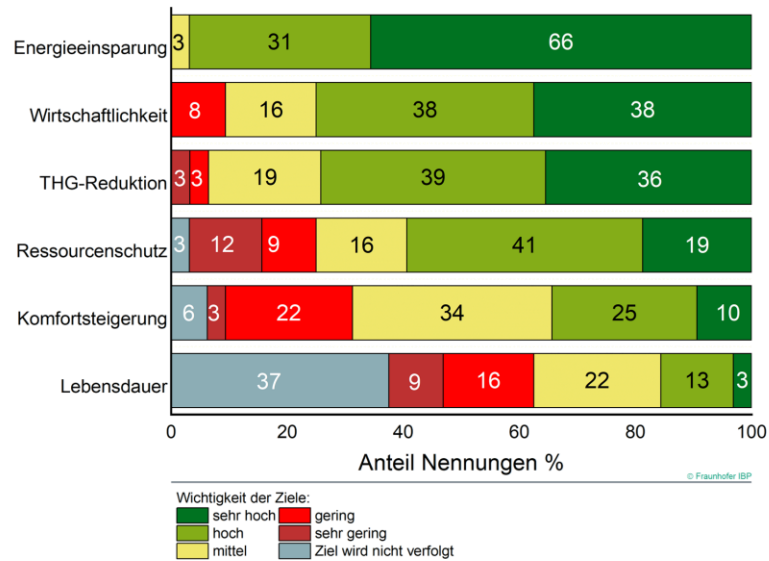


Abbildung 33: Optimierungsziele innerhalb der befragten Verbundvorhaben (n = 27). Quelle: eigene Darstellung.

Wie erwartet werden mehrheitlich der Energieeinsparung sowie der Steigerung der Wirtschaftlichkeit eine hohe Bedeutung beigemessen. Der Einsatz von Betriebsoptimierungen für die Ziele Lebensdauererhöhung oder Komfortsteigerung wird von den Teilnehmenden als weniger wichtig eingestuft. Als weitere Ziele wurden von fünf befragten Vorhaben die Netzdienlichkeit bzw. die Erleichterung der Einbindung von erneuerbarer Energie genannt.

Bei den überwiegend genannten Optimierungszielen, welche durch die Betriebsoptimierung mit smarten Technologien erreicht werden sollen, stellt sich die Frage, wie der Erfolg einer Maßnahme quantifiziert werden kann. Eine in der Fachwelt anerkannte Methode zur Evaluation von Einsparmaßnahmen ist im „International Performance Measurement & Verification Protocol“ (IPMVP) [60] beschrieben. Dabei ist die Einsparung als Differenz zwischen Verbrauch im Referenzfall (Baseline) und Verbrauch im Berichtszeitraum unter der Berücksichtigung von Anpassungen definiert. Die vier Methoden sind:

- Methode A: Teilweise Messung / Berechnung der Maßnahme mit teilweise geschätzten Parametern
- Methode B: Vollständige Messung der Maßnahme
- Methode C: Vergleich ganzer Gebäude
- Methode D: Kalibrierte Simulation für das gesamte Gebäude

Aus den Angaben der Teilnehmenden zur Frage, wie mögliche Einsparungen, die durch die Betriebsoptimierung erzielt werden, erfasst werden können, wurde eine Zuordnung der Optionen gemäß IPMVP vorgenommen. Während sieben Vorhaben keine Angaben zu möglichen Einsparpotenzialen gemacht haben, lassen sich 10 Projekte identifizieren, die Option C nutzen. Das bedeutet, es werden komplette Systeme (Gebäude/Quartiere) real mit und ohne Optimierungsmaßnahme gemessen und nach Anpassung der Randbedingungen (z. B. Klima) miteinander verglichen. Bei den Vorhaben, die Komponenten oder Einzelräume im Fokus haben, wird meistens Option A (sieben Vorhaben) verwendet. Hierbei wird häufig der Referenzfall durch einfache Berechnungen oder teilweise Simulationen ermittelt. Die Ausnahme bilden vollständige Messungen im Referenz- und Realfall nach Option B (zwei Vorhaben) oder die vollständige kalibrierte Simulation (ein Vorhaben). Die Ergebnisse wurden in der Fachzeitschrift Gebäude-Energieberater (GEB) im März 2024 veröffentlicht [9].

3.4.3.2 Lastprofile

Innerhalb des Arbeitspakets Smarter Gebäudebetrieb sollten Lastprofile aus den Forschungsvorhaben identifiziert werden, um diese für die Nutzung in weiteren Forschungsprojekten zur Verfügung stellen zu können. Hierzu wurde ein modulübergreifender Arbeitskreis mit BF-Modul 1 (Monitoring) und BF-Modul 4 (Digitalisierung) initiiert und in regelmäßigen Abständen durchgeführt. Die Diskussion innerhalb der regelmäßigen Treffen führte zur Entscheidung, dass die von Modul 1 entwickelte Monitoringdatenbank, welche auf der bereits bestehenden Open Energy Platform (OEP) basiert [61], auch für die Ablage von Lastprofilen genutzt werden soll.

Das Prinzip der Monitoringdatenbank basiert darauf, dass gemessene Daten aus Demonstrationsvorhaben von den Projektverantwortlichen mithilfe eines konsistenten Datenschemas in die Datenbank mittels digitaler Datenschnittstellen (API) zentral abgelegt werden. Damit Daten nicht doppelt abgelegt werden, welches die Datenintegrität bei möglichen Änderungen im Ursprungsdatensatz erschwert, und um den Aufwand für Projektleitende zu begrenzen, wurde auf eine eigens entwickelte Lastprofildatenbank verzichtet. Vielmehr sollte eine Methode entwickelt werden, die die Projektleitenden und Dritte in die Lage versetzen, Lastprofile aus bestehenden Monitoringdaten zu identifizieren, um diese anschließend abfragen zu können.

Lastprofile im Sinne der Aufgabenstellung im Arbeitspaket sind Zeitreihen von Messdaten, die insbesondere den Verlauf von Energieverbräuchen über bestimmte Zeiträume umfassen. Innerhalb der Messdatenbank können sogenannte Lastprofile aus realen Messdaten abgefragt werden. Lastprofile können entweder den zeitlichen Verlauf von gemessenen Größen repräsentieren, oder aber im Kontext mit unabhängigen Variablen (z. B. Wetterdaten) dargestellt und ausgewertet werden.

Hauptsächlicher Anwendungsbereich sind Monitoring- bzw. Demonstrationsvorhaben, die auf Gebäude oder Quartiere fokussieren. Das im Folgenden beschriebene Prinzip der Lastprofilermittlung ist jedoch auch auf Komponentenebene anwendbar, wobei hier der Forschungscharakter von Neuentwicklungen eher ungeeignet erscheint, um für Dritte aussagefähige Lastprofile verfügbar zu machen.

Mögliche Anwendungen von Lastprofilen sind:

- Die Auslegung von Anlagentechnik in Neubauten, Bestand, Quartier
- Der Entwurf von Versorgungskonzepten
- Die Wirtschaftlichkeit von Versorgungskonzepten (insbesondere bei Nutzung variabler Energietarife)
- Die Flexibilisierung von Wärme: Prognose von Verbräuchen
- Die Identifikation und Glättung von Lastspitzen
- Die Verteilung des Strombedarfs für Wärmeanwendungen auf Grundlast- und Spitzenlastblöcke
- Potenziale für die Einbindung erneuerbarer Energie in den Wärmemarkt
- Der Abgleich mit simulierten, bzw. generativ erzeugten Lastprofilen (siehe hierzu auch <https://wissen-digital-ewb.de/de/LastProfile>).

Im Folgendem wird anhand eines einfachen Beispiels der Prozess der Identifikation und Abfrage von Lastprofilen innerhalb der Monitoringdatenbank erläutert. Projektleiter:Innen haben hier die besondere Verantwortung, Dritte, die Lastprofile nutzen wollen, in die Lage zu versetzen, nachvollziehbare Daten zu erhalten.

Wesentlich für die Aussagekraft und Nutzbarkeit der aus Energieverbrauchsdaten erstellten Lastprofile ist die Kenntnis über die relevanten Messpunkte, sowie der zugehörigen Metadaten aus denen Lastprofile erstellt werden können siehe (Abbildung 34). Wichtige Messgrößen sind dabei:

- Endenergieverbräuche (unterschieden nach der Art der Energieträger) für die Beheizung, Kühlung und Trinkwarmwasserbereitung

- Nutzenergieverbräuche (Wärmemengen für die Heizung, Kühlung und Trinkwarmwasserbereitung)
- Stromverbräuche (Haushaltsstrom, Beleuchtung, Hilfsstrom für technische Gebäudeausrüstung)

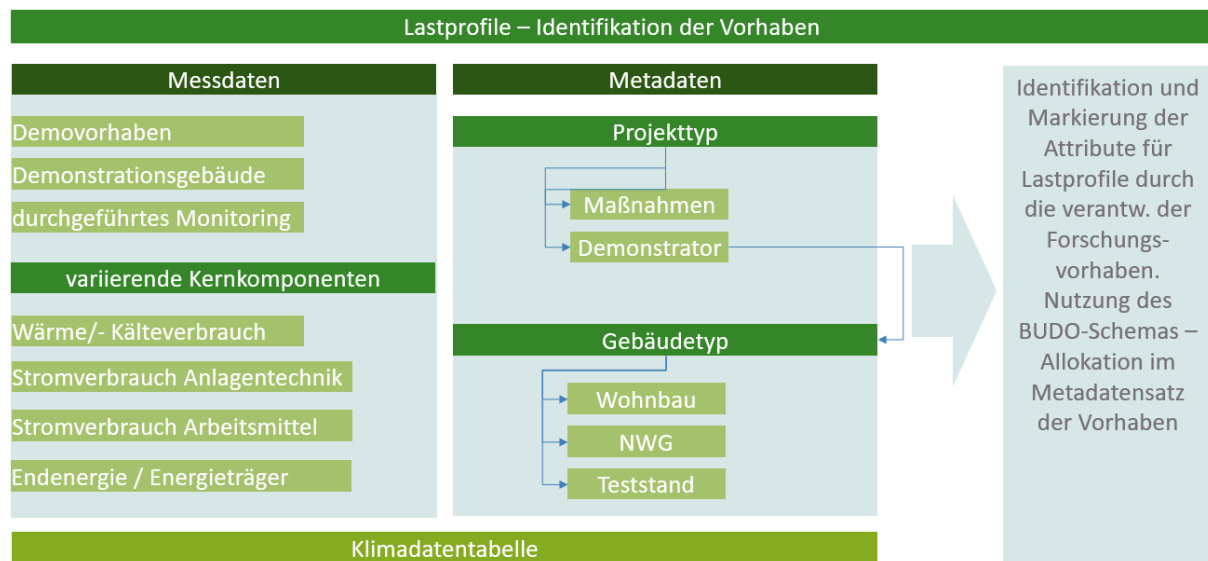


Abbildung 34: Art der Daten, notwendige Metadaten und prinzipieller Prozess zur Identifikation der Lastprofile innerhalb der Monitoring-Datenbank. Quelle: eigene Darstellung.

Ein geeignetes und empfohlenes Instrument für die Messstellenidentifikation ist die Darstellung des gemessenen Systems in einem sogenannten Energieflussschema, wie bereits im EnOB/EnSan-Leitfaden für das Monitoring beschrieben wurde [62]. Basierend auf den Messkonzepten in den jeweiligen Monitoringvorhaben werden diejenigen Zähler herangezogen, für die Lastprofile erstellt werden können. Dies sind üblicherweise diejenigen Zähler und Sensoren, die die End- und Nutzenergieverbräuche für Gebäude oder Quartiere messen. Der Prozess der Datenbereitstellung soll dabei ausgehend von den Forschungsvorhaben selbst in einer vorgegebenen Struktur durchgeführt werden. Als Eingabestruktur dient das sogenannte Buildings Unified Data point naming schema for Operation management (BUDO)-Schema, mit dessen Hilfe Messdatenpunkte eindeutig und systematisch benannt werden können. Das Schema dient dazu, die Messpunkte eines Demonstrationsvorhabens (die in der Regel auf den Erfordernissen der individuellen Vorhaben basieren) eindeutig und standardisiert zu benennen. Das Verfahren des BUDO-Schemas wird in der aktuellen Fassung des Monitoringleitfadens detailliert beschrieben.

Als Beispiel wurde ein Energieflussschema eines fiktiven Demonstrationsvorhabens entwickelt, um nachfolgend den Prozess der Identifikation von Lastprofilen zu erläutern. Dieses umfasst ein Gebäude, in welchem eine technische Anlagenkonfiguration für Niedrigstenergiegebäude, bestehend aus einer Wärmepumpe mit einer Anbindung an das Erdreich, sowie einem Kombispeicher für Heizung und Trinkwarmwasserbereitung, installiert ist. Zusätzlich wurde in dem Schema eine PV-Anlage integriert.

Im entwickelten Fall (siehe Abbildung 35) sollen Lastprofile aus dem Stromverbrauch für die Wärmepumpe, sowie dem Hilfsstromverbrauch für die technische Gebäudeausrüstung und dem Haushaltsstromverbrauch abgefragt werden können. Vervollständigt werden die in das Gebäude eingehenden Energieströme durch die Umweltwärme, welche als Wärmequelle (Erdsonde) für die Wärmepumpe genutzt wird und die Stromerzeugung über eine PV-Anlage. Auf der Seite der Energiedeckung sind dies die Wärmemengenzähler für das Heizungssystem und die Trinkwarmwasserbereitung.

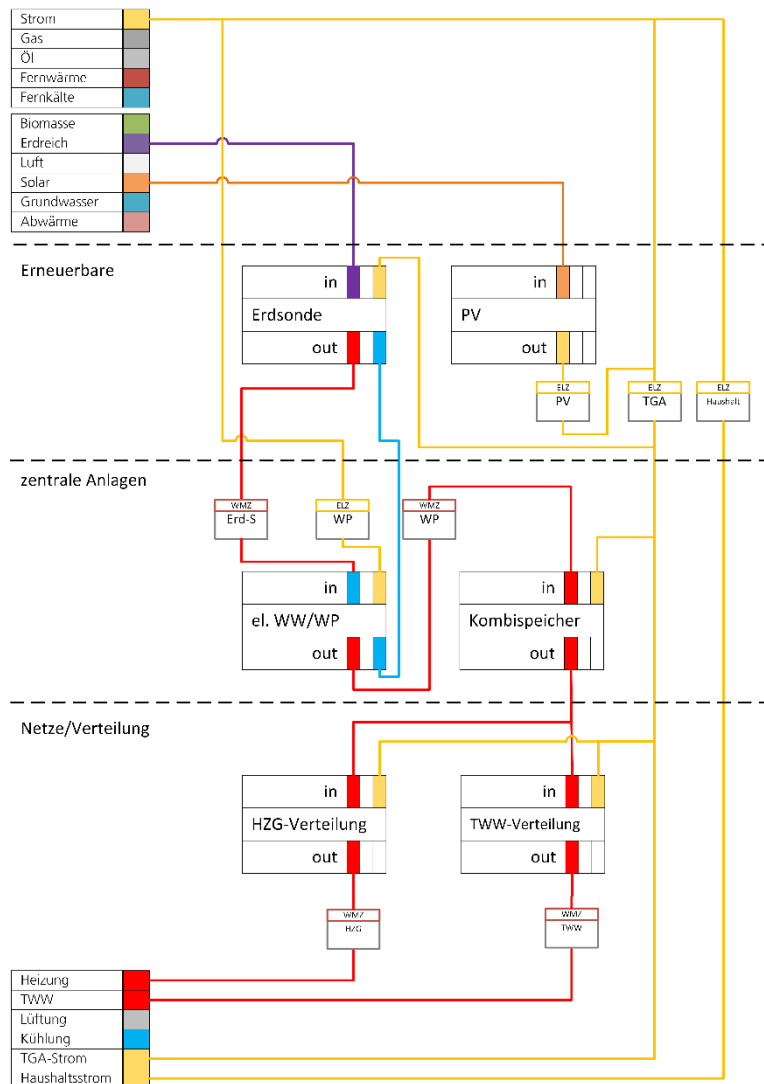


Abbildung 35: Darstellung eines Energieflussschemas in Anlehnung an [62]. Das Messkonzept eines fiktiven Demonstrationsvorhabens wird ausgehend vom Energieeinsatz bis zur Energiedeckung dokumentiert. Die Zählerpositionen sind dabei leicht identifizierbar.

Für eine eindeutige Identifikation der für die Lastprofile relevanten Messstellen ist es notwendig, die Zählerbezeichnungen in die standardisierte Form des BUDO-Schemas zu übersetzen. In Tabelle 7 sind die entsprechenden Bezeichnungen zu den im Energieflussschema definierten Messpunkten aufgelistet.

Tabelle 7: Umwandlung der Zählernamen aus einem Monitoringkonzept (Energieflussschema) in BUDO-konforme Messstellenbezeichnungen.

Mess-Nr.	Name	Erläuterung	Name BUDO-Schlüssel
1	ELZ_WP	Stromverbrauch Wärmepumpe (Verdichter und Steuerung), ohne Erdsondenpumpe (Mitvermessung über TGA-Strom).	HP+COMP_H__AC_MEA+EN.EL_DO
2	ELZ_TGA	Stromverbrauch Hilfsantriebe für technische Gebäudeausrüstung (Pumpen, Aktoren, ...)	EL+GPS_H__AC_MEA+EN.EL_DO
3	ELZ_Haushalt	Haushaltsstromverbrauch	EL+GPS_PGR__AC_MEA+EN.EL_DO
4	ELZ_PV	Stromertrag PV-Anlage	PV_GEN+EL__AC_MEA+EN.EL_DO
5	WMZ_Erd-S	Wärmemenge Erdsonde an Wärmepumpe	GT.PROB_H__GLY_MEA+EN.H_DO
6	WMZ_WP	Erzeugte Nutzwärme der Wärmepumpe	HP_H__WS_MEA+EN.H_DO
7	WMZ_HZG	Wärmemenge Heizkreise	DEM+H_H__WS_MEA+EN.H_DO
8	WMZ_TWZW	Wärmemenge Trinkwarmwasser (ohne Zirkulation)	DEM+H_H__WS_MEA+EN.H_DO

Mit Hilfe der identifizierten Messstellen, sowie des definierten Namens der Messstelle im Sinne des vorgestellten BUDO-Schemas können die entsprechenden Daten aus der Monitoringdatenbank abgefragt werden.

Die Aussagefähigkeit von Lastprofilen steigt mit der Kenntnis der zugrundeliegenden Eigenschaften eines Messobjektes. In Abstimmung mit BF-Modul I und BF-Modul IV wurde die für die Nutzung der Daten notwendige Beschreibung der Metadaten für Demonstrationsvorhaben erarbeitet und in den Leitfaden für das Monitoring integriert. Im Kontext der hier vorgestellten Methode müssen dabei mindestens folgende Eigenschaften des Monitoringobjektes zur Verfügung gestellt werden (siehe Tabelle 8):

Tabelle 8: Auflistung der notwendigen Metadaten für die Ermittlung von Lastprofilen.

Metadaten	Attribute
Fokus des Monitoringvorhabens	Einzelgebäude, Gebäudeensemble, Quartiere. Angabe, ob es sich um Neubauten oder Bestandsgebäude handelt.
Ziele im Vorhaben	Erläuterung der Ziele im Vorhaben (Klimaneutralität, Effizienz, Anlagenoptimierung, etc.). Beschreibung der Maßnahmen an Gebäuden/Quartieren, die in der Demonstration im Fokus stehen.
Bilanzgrenzen	Beschreibung des mithilfe von Energiezählern eindeutig messbaren Bilanzbereichs (kann mithilfe eines Energieflussschemas dokumentiert werden)
Nutzung	Angabe der Nutzungsprofile gemäß DIN V 18599-10 [63]. Zusätzlich kann es hilfreich sein, die Nutzung von Gebäuden, Gebäudeteilen oder Quartieren gemäß AdV Nutzungsartenkatalog [1] zuzuordnen.
Gebäudehülle	Beschreibung des energetischen Standards des Gebäudes/der Gebäude. Auflistung der U-Werte der Gebäudehülle, Fensterqualitäten, etc.
Anlagentechnik	Beschreibung der technischen Ausrüstung: Wärmeerzeuger, Kältetechnik, Lüftungstechnik, Speicher und Verteilsysteme, erneuerbare Energienutzung. Im Falle von Quartiersvorhaben: Beschreibung des Versorgungskonzepts (Wärmenetze).
Bezugsgrößen	Beheizte/gekühlte Nettoraumfläche (NRF) im bilanzierten Bereich (bei Mischnutzung Angabe der Zonenfläche, die durch die verschiedenen Nutzungsprofile abgegrenzt werden). Weitere Angaben können z. B. die Anzahl von Wohneinheiten, Anzahl der Bewohner und Bewohnerinnen, bzw. Nutzende umfassen.
Standort	Standort des Objekts/der Objekte, insbesondere für den Klimastandort notwendig.
Berechnete Energiebedarfe	Angabe der zuvor berechneten Energiebedarfe (aus Energiebilanz gemäß DIN V 18599 oder thermische Simulation)

3.4.3.3 Robuster Gebäudebetrieb

Die tatsächliche Performance energieeffizienter Gebäudesysteme wird maßgeblich von Unsicherheitsfaktoren in der Betriebsphase beeinflusst. Dynamisches Nutzungsverhalten, wechselnde ökonomische Rahmenbedingungen oder Störungen an der Gebäudetechnik können zu einem Performance-Gap zwischen den geplanten und tatsächlichen Energieverbräuchen führen. Im Rahmen der Arbeiten in BF-Modul II wurden diese Unsicherheitsfaktoren systematisch analysiert, mögliche Konzepte und Technologien zur Vermeidung von Performance-Gaps untersucht und Ansätze zur Entwicklung robuster Gebäudebetriebsweisen ausgearbeitet. Zusätzlich wurden die Forschungsansätze der Förderinitiative EWB im Hinblick auf die Berücksichtigung dieser Unsicherheitsfaktoren und die Steigerung der Robustheit im Gebäudebetrieb queranalysiert. Die zentralen Erkenntnisse werden im Folgenden vorgestellt.

3.4.3.3.1 Unsicherheitsfaktoren im Gebäudebetrieb

Einfluss des Nutzer:Innen-Verhaltens

Das Nutzer:Innen-Verhalten bei der Interaktion mit dem Gebäudesystem wird in diversen Vorgängerstudien als ein wichtiger Einflussfaktor auf den Energiebedarf eines Gebäudes identifiziert [64, 65, 66].

Zudem stellt das Nutzer:Innen-Verhalten in Gebäuden eine der Hauptursachen für Unsicherheiten bei der energetischen Modellierung von Gebäuden dar [67]. Die Differenz zwischen dem simulierten und dem tatsächlichen Energieverbrauch nennt man Energy Gap [68]. Bei einer Studie von Venturi et al. [67] wurde festgestellt, dass der Unterschied zwischen dem angenommenen und dem tatsächlichen Heizenergiebedarf eines Gebäudes in Innsbruck (Österreich) signifikant abweicht. Dabei wurde festgestellt, dass der zuvor berechnete Heizenergiebedarf aufgrund des Nutzer:Innen-Verhaltens um 90 % bis 130 % überschritten wurde. Aufgrund von Bauteilmängeln wurde ein zusätzlicher Heizenergiebedarf von ca. 45 % bis 70 % festgestellt. Für einen robusten Gebäudebetrieb hinsichtlich des Nutzer:Innen-Verhaltens sollten in der Planungsphase die Nutzerpräferenzen, -prioritäten und daraus resultierende Interaktionen mit dem Gebäudesystem analysiert werden.

Die Entscheidungsfaktoren vom Nutzer:Innen-Verhalten unterscheiden sich bei Wohn- und Nichtwohngebäuden. In Wohngebäuden resultiert das Nutzer:Innen-Verhalten bei der Energienutzung grundsätzlich aus einer Priorisierung in Bezug auf die Zielsetzungen Kosteneinsparung und Erreichung des maximalen Komforts, da die Nutzer:Innen Energiekosten selbst zahlen. Die Priorisierung hängt von unterschiedlichen demografischen Aspekten ab, wie Alter, Job und persönliche Präferenzen, und lässt sich schwer charakterisieren und vorhersagen [69, 70]. Mögliche Maßnahmen zur Ermittlung der Nutzerprioritäten bei der Raumklimatisierung und Nutzung der Haushaltsgeräte sowie die darauf aufbauende Entwicklung optimierter, nutzerzentrierter Betriebsstrategien ist eine ausführliche Nutzer:Innen-Befragung. Bei Zhao et al. [71] geben die Nutzer:Innen im Vorfeld einen möglichen Spielraum an, in dem der Zeitpunkt des Betriebs des Gerätes verschoben werden darf. Bei Anvari-Moghaddam et al. [72] wird ein ähnlicher Ansatz entwickelt. Hier geben die Nutzer:Innen eine mögliche Nutzungszeit und eine bevorzugte Nutzungszeit an, sowie die Länge des Betriebs und den erwarteten Energieverbrauch. Bei Ogunjuyigbe et al. [73] beantworten die Nutzer:Innen sowohl eine Abfrage der Uhrzeit-bezogenen Zufriedenheit als auch der Geräte-bezogenen Zufriedenheit. Zur Feststellung der Uhrzeit-bezogenen Zufriedenheit füllen die Nutzer:Innen für je ein Gerät aus, in welchen Stunden sie das Gerät bevorzugt betreiben möchten. Zur Feststellung der Geräte-bezogenen Zufriedenheit priorisieren die Nutzer:Innen für je eine bestimmte Stunde die Geräte nach ihrem Einfluss auf den Komfort. Daraus wird eine Gesamtpriorisierung erstellt, nach der der Betrieb der Geräte terminiert wird.

In Nichtwohngebäuden besteht ähnlich wie in Wohngebäuden das Bedürfnis nach thermischer Behaglichkeit, während die Energieeinsparung für die Nutzer:Innen eine untergeordnete Rolle spielt, da die Nutzer in der Regel nicht direkt von den Energiekosten betroffen sind. Zusätzlich kann ein Zimmer in Nichtwohngebäuden durch mehrere Nutzer:Innen genutzt werden, die unterschiedliche Präferenzen bei der Raumtemperatur und Beleuchtung aufweisen. Wegen der heterogenen Nutzerpräferenzen soll das Gebäudesystem in Nichtwohngebäuden hinsichtlich der geplanten Energieeffizienz möglichst intelligent geregelt werden, um einen bedarfsgeführten Betrieb mit einer hohen durchschnittlichen Nutzerzufriedenheit zu ermöglichen und ungewünschte Nutzereingriffe in das Gebäudesystem zu vermeiden. Zur Gestaltung eines intelligenten, bedarfsgeführten Betriebs können, ähnlich wie in Wohngebäuden, Nutzer:Innenbefragungen als Basis dienen. Um die Behaglichkeit in Innenräumen zu erhöhen und somit die Mensch-Gebäudeinteraktion (bspw. Fenster öffnen) zu minimieren, wurde unter anderem die Norm ASHRAE 55 entwickelt. Sie basiert auf subjektiven Personenbefragungen und legt Grenzwerte für die thermischen Parameter wie Temperatur, Luftgeschwindigkeit und Feuchtigkeit fest, die dazu beitragen, eine behagliche Umgebung für die meisten Menschen zu schaffen. Dabei berücksichtigt die Norm auch Faktoren wie Kleidung, körperliche Aktivität und Aufenthaltszeit im Raum, um genaue Empfehlungen für die Gebäudeklimatisierung zu geben [74]. Nichtsdestotrotz reichen subjektive Nutzerbefragungen nicht aus, um den Betrieb vom Gebäudeenergiesystem ausreichend genau auf das Nutzer:Innen-Verhalten anzupassen. Um den Energy Gap weiter zu senken, indem das Nutzer:Innen-Verhalten genauer erklärt und vorhergesagt wird, wurde in den letzten Jahren der OPA-Modellierung

(Occupant's presence and actions/OPA) vermehrt Aufmerksamkeit geschenkt. Darüber hinaus haben sich in den letzten Jahren maschinelles Lernen und Deep Learning als vielversprechende Methoden für die OPA-Modellierung in realen Anwendungen herauskristallisiert. [75] Durch intelligente Regelungen in den in [76, 77] untersuchten Bürogebäuden ist eine Energieeinsparung im Bereich zwischen 10 und 32 % möglich.

Vorhersagegüte der entwickelten Algorithmen für prognosebasierte Regelung in der Forschung

Im Zusammenhang mit der breiten Anwendung von Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT) im Gebäudebereich und der großen Menge verfügbarer Gebäudedaten hat die prognosebasierte Regelung heutzutage die Aufmerksamkeit der Forschungscommunity gewonnen. Im Vergleich zur konventionellen Proportional-Integral-Differential-basierten (PID) Regelung können durch die prognosebasierte Regelung ein stabileres Regelverfahren und eine höhere Energieeffizienz erreicht werden. Durch die Prognose von Energiebedarfen und weiteren wichtigen Randbedingungen wie Energiepreise, Außentemperaturen und solare Einstrahlungen werden bei der prognosebasierten Regelung optimale Fahrpläne für die Anlagentechniken abgeleitet und umgesetzt. Somit hängt die resultierende Performance der Gebäudesysteme vorrangig von der Vorhersagegüte der verwendeten Algorithmen ab, insbesondere der Prognosealgorithmen von Energiebedarfen.

Eine hohe Vorhersagegüte bedeutet, dass die Algorithmen in der Lage sind, präzise Vorhersagen über den zukünftigen Energiebedarf eines Gebäudes zu treffen. Um eine solche Genauigkeit zu erreichen, müssen verschiedene Faktoren berücksichtigt werden. Ein entscheidender Faktor ist die Qualität der Eingangsdaten, die unter anderem von der Vollständigkeit, der Genauigkeit, der Konsistenz und der Relevanz der Datensätze abhängt. Um fehlerhafte Daten zu korrigieren, können fortgeschrittene statistische Modellierungen wie multiple lineare Regressionen, adaptives lineares Filtering, normalisierte kleinste Quadrate, rekursive kleinste Quadrate und das Gaußsche Mischmodell angewendet werden. Die Effizienz dieser Modelle variiert je nach Qualität und Verfügbarkeit der Eingangsdaten. Die Wahl des Modells und dessen Anpassung hängen somit von der spezifischen Anwendung ab [78, 79].

Ein weiterer wichtiger Faktor ist die Auswahl der Vorhersagemodelle [79]. Grundsätzlich können die Vorhersagemodelle in drei Kategorien eingeteilt werden: White-Box-, Black-Box- und Grey-Box-Modelle [80].

White-Box- oder ingenieurtechnische Modelle sind Modelle, bei denen die internen Mechanismen und Strukturen bekannt und transparent sind, wodurch die Entscheidungen und Vorhersagen des Modells nachvollziehbar bleiben. Daher werden sie oft verwendet, wenn die Interpretierbarkeit des Modells von besonderer Bedeutung ist. Black-Box- oder datenbasierte Modelle hingegen sind nicht transparent. Hier wird der Fokus auf Ein- und Ausgabefunktionen gelegt, ohne dass die internen Zusammenhänge bekannt sind. Ein Beispiel für Black-Box-Modelle sind künstliche neuronale Netzwerke mit mehreren Schichten. Diese Modelle zeichnen sich dadurch aus, dass sie in vielen Anwendungsgebieten hohe Leistungen erzielen können. Grey-Box-Modelle sind eine Kombination aus Black-Box- und White-Box-Modellen. Sie bieten eine Balance zwischen Leistung und Interpretierbarkeit [81].

Datenbasierte (Black-Box) Ansätze haben aufgrund ihrer einfachen Handhabung, Praktikabilität, Anpassungsfähigkeit und hohen Vorhersagegenauigkeit enorme Popularität bei der Vorhersage des Energieverbrauchs von Gebäuden erlangt. Im Vergleich zu ingenieurtechnischen (White-Box) Ansätzen liefern sie genaue Vorhersagen, die auf den verfügbaren Daten wie Energieverbrauch, klimatischen Bedingungen, zeitlichen Faktoren und Belegung basieren. Diese Daten können leicht über neue Sensor- und Kommunikationstechnologien aus den Gebäuden gewonnen werden [82]. Unter den datenbasierten Ansätzen haben sich insbesondere künstliche neuronale Netze (ANN) und ihre Varianten wie das Feed-Forward-Neuronale Netzwerk (FFNN), das Rekurrente Neuronale Netzwerk (RNN) und das Pro-

Neuronale Netzwerke (PNN) als am häufigsten verwendete Modelle für die Energieverbrauchsvorhersage in Gebäuden etabliert. Diese Modelle werden sowohl für kurz-, mittel- als auch langfristige Vorhersagen sowie für Fehlererkennung und -diagnose eingesetzt [83, 84].

Insgesamt spielt die Vorhersagegüte prognosebasierter Algorithmen eine zentrale Rolle im Betrieb von Gebäudesystemen. Durch die Berücksichtigung der Qualität der Eingabedaten, die Auswahl geeigneter Vorhersagemodelle, die Beachtung der Komplexität der zugrundeliegenden Prozesse sowie eine sorgfältige Implementierung und Schulung der Algorithmen kann die Vorhersagegüte verbessert werden. Dies ermöglicht eine effektive Optimierung des Energieverbrauchs in Gebäuden und trägt somit zur nachhaltigen Nutzung von Energieressourcen bei [81].

Fehleranfälligkeit technischer Komponenten

Ein Gebäudesystem besteht aus mehreren technischen Komponenten, die zusammenarbeiten, um eine angemessene Energieversorgung und ein angenehmes Innenraumklima zu gewährleisten. Einige der wichtigsten Komponenten eines Gebäudesystems sind gemäß [85]:

- Wärme-/Kälteerzeuger
- Trinkwarmwasserinstallation
- Belüftung
- Klimatisierung
- Beleuchtung
- Sonnenschutz
- Stromerzeugung
- Stromspeicher
- Energiemanagementsystem (EMS)

Wenn Fehler bei diesen Komponenten auftreten, kann die Effizienz des Gebäudesystems beeinträchtigt werden. Bei den Fehlern wird zwischen Störungen der Hardware und Software unterschieden. Hardwarestörungen stellen physische Defekte oder Ausfälle in den Systemkomponenten dar, wie zum Beispiel defekte Ventilatoren oder Pumpen. Diese führen zu unerwartetem Stromverbrauch und einem vorzeitigen Verschleiß der betroffenen Geräte. Die Fehleranfälligkeit der Anlagentechniken eines Gewerks im Gebäudesystem, wie zum Beispiel des Wärmeerzeugers, ist unterschiedlich stark von der Technologiereife der Geräte abhängig.

Wärmepumpensysteme werden als eine vielversprechende Option für die Energiewende im Gebäudereich angesehen. Eine fachgerechte Planung und Auslegung sind entscheidend für den effizienten Betrieb dieser Technologie. Diverse Untersuchungen haben jedoch aufgezeigt, dass wesentliche Energieverluste aufgrund unzureichender Installation und mangelnder Instandhaltung der Wärmepumpensysteme auftreten können. Die Erkenntnisse belegen, dass zwischen 20 und 50 % der Wärmepumpen in Gebäuden lediglich 70 bis 80 % oder weniger der Auslegungsleistungszahl erzielen. Im Zuge einer unsachgemäßen Betriebsweise kann der Energieverbrauch um bis zu 40 % erhöht sein. In einer Studie zur Fehleranfälligkeit von Wärmepumpen haben Bellanco et al. herausgestellt, dass der Verdichter zu den kritischsten Komponenten in Wärmepumpen zählt [86, 87].

Der Gebäudebetrieb von Nichtwohngebäuden kann gegenüber dem in Wohngebäuden höhere Komplexität aufweisen und somit die Auftretenswahrscheinlichkeiten von Fehlern im Betrieb erhöhen. Kati-pamula und Brambley schätzten, dass schlecht gewartete, abgenutzte und unsachgemäß gesteuerte Anlagen in Gewerbegebäuden zu 15 bis 30 % des erhöhten Energieverbrauchs beitragen [88]. Für raumlufttechnische Anlagen (RLT-Anlagen) ergab die Auswertung der Arbeitsprotokolle von 44 Gebäuden in der Studie von Yang et al. [89], dass über einen Zeitraum von sieben Jahren 6.398 Instandset-

zungsarbeiten im Zusammenhang mit RLT-Anlagen protokolliert wurden. In Abbildung 36 sind die Teilkomponenten und deren Anteile an den gesamten Instandsetzungsarbeiten im Bereich der RLT-Anlagen aufgelistet.

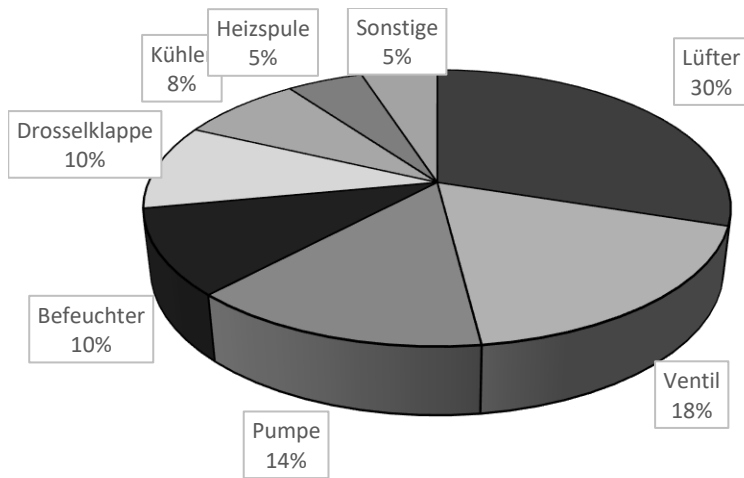


Abbildung 36: Fehlerrate der Teilkomponenten von RLT-Anlagen in 44 Gebäuden im Zeitraum von sieben Jahren. Die Anzahl der dokumentierten Fehler betrug insgesamt: 6.398. Quelle: [89].

Um die Störungen der anlagentechnischen Komponenten im Gebäudesystem zu minimieren, spielt das Inbetriebnahmemanagement von Gebäuden eine entscheidende Rolle. Durch Überwachung und Optimierung während der Inbetriebnahme sowie regelmäßige Wartung lässt sich die Fehleranfälligkeit von Komponenten reduzieren. Eine höhere Zuverlässigkeit der technischen Systeme spart Kosten und führt zu einer Reduzierung von Ausfällen und Störungen. Zudem kann durch eine optimale Einstellung und Abstimmung der technischen Anlagen der Energiebedarf von Gebäuden reduziert werden, was zu einer Senkung der Energiekosten und einer nachhaltigen Nutzung von Ressourcen beiträgt [90].

Prognose- und Simulationsmodelle, die eine frühzeitige Identifizierung von Fehlerquellen ermöglichen, können die Häufigkeit von Störungen einzelner Komponenten weiter senken. Hierfür werden jedoch umfassende Datensätze benötigt, welche über einen ausreichend langen Zeitraum gesammelt werden müssen. Auf diese Weise können durch die Analyse der Betriebsdaten präzise Vorhersagen über das Verhalten von Systemen getroffen werden, was eine gezielte Wartung und Reparatur ermöglicht [89].

Im Gegensatz zu Hardwarestörungen bezeichnen Softwarestörungen Störungen in der Software, z. B. in der Steuerung oder Regelung des Systems, welche die Funktionalität des Gebäudesystems beeinträchtigen. Hierbei handelt es sich um unzureichende oder fehlerhafte Programmierungen. Eine effektive Methode, um die Auswirkungen solcher Fehler zu vermeiden oder zu vermindern, ist die regelmäßige Wartung und Überprüfung der Systemkomponenten sowie der Software. Eine adäquate Wartung ermöglicht nicht nur eine schnellere Erkennung von Fehlern, sondern auch deren präventive Behebung, was wiederum zu einer höheren Effizienz und einer längeren Lebensdauer des Gebäudesystems führt [89, 86, 87].

Ein weiterer Ansatz, um das Fehlerpotential des Gebäudesystems zu minimieren, ist der Einsatz von Low-Tech-Komponenten. Der Begriff "Low-Tech" ist für Gebäude bisher nicht eindeutig definiert. Generell versteht man unter Low-Tech jedoch eine Reihe von Technologien und Ansätzen, die darauf abzielen, die Energieeffizienz und Nachhaltigkeit von Gebäuden zu verbessern, ohne dabei auf komplexe und teure Technologien zurückzugreifen. Viele robuste Gebäudesysteme nutzen Low-Tech-Ansätze, um eine zuverlässige und kosteneffektive Energieversorgung zu gewährleisten. Zu Low-Tech-Anwendungen lassen sich beispielsweise Solarkollektoren, begrünte Dächer und Fassaden, natürliche Belüftung oder auch Wärmerückgewinnungssysteme zählen [91].

3.4.3.3.2 Zusammenfassung der Ansätze zur Entwicklung robuster Gebäudebetriebsstrategien

Ein zentraler Unsicherheitsfaktor im Gebäudebetrieb ist das Nutzer:Innen-Verhalten. Studien zeigen, dass Unterschiede in der Interaktion der Nutzer:Innen mit den Systemen erhebliche Abweichungen im Energieverbrauch verursachen können. Um diese Variabilität zu adressieren, wurden in der Analyse von BF-Modul II Nutzerbefragungen, datenbasierte Modellierungsansätze wie die OPA-Modellierung (Occupant's Presence and Actions) sowie maschinelle Lernverfahren als geeignete Ansätze zur Erfassung und Prognose des Nutzer:Innen-Verhaltens identifiziert. Diese Algorithmen können den Energy Gap reduzieren, indem sie präzise Vorhersagen treffen und Regelungsstrategien dynamisch anpassen.

Die Prognosegüte von Algorithmen zur energieeffizienten Regelung spielt eine entscheidende Rolle für robuste Betriebsweisen. Durch die Vorhersage von Energiebedarfen, Energiepreisen oder solaren Einstrahlungen können optimale Betriebspläne erstellt werden. Die Genauigkeit solcher Prognosen hängt maßgeblich von der Qualität der Eingangsdaten und der Wahl geeigneter Vorhersagemodelle ab. Datenbasierte Ansätze, wie künstliche neuronale Netzwerke (ANN) oder rekurrente neuronale Netzwerke (RNN), haben sich in der Praxis als besonders leistungsfähig erwiesen. Gleichzeitig bieten hybride Modelle, die ingenieurtechnisches Wissen mit datenbasierten Verfahren kombinieren, eine Balance zwischen Interpretierbarkeit und Genauigkeit.

Ein weiteres zentrales Element robuster Betriebsweisen ist die Minimierung der Fehleranfälligkeit technischer Komponenten. Low-Tech-Ansätze, wie eine natürliche Belüftung oder einfache Wärmerückgewinnungssysteme, wurden als vielversprechende Optionen hervorgehoben, da sie durch ihre Robustheit und geringe Fehleranfälligkeit die Zuverlässigkeit des Gebäudebetriebs erheblich steigern können.

3.4.3.3.3 Robuster Gebäudebetrieb in der Forschung

Im Folgenden wird die Querauswertung zu Projekten im Gebäudebereich der Forschungsinitiative EWB hinsichtlich ihres Forschungsfokus auf Ansätze zur Erhöhung der Robustheit des Gebäudebetriebs vorgestellt. Als Datengrundlage dienten hauptsächlich Informationen zu Forschungsprojekten im Gebäudebereich, die aus der durchgeführten Projektumfrage im Jahr 2021 stammen (modulübergreifender Fragebogen der Begleitforschung EWB) und dem M2-Cluster-Fragebogen aus dem Frühjahr 2023. Bis zum Zeitpunkt des Cluster-Fragebogens wurden insgesamt 185 Projekte, bestehend aus 598 Teilprojekten, dem BF-Modul II zugeordnet. Von den 185 Projekten haben 87 den Fragebogen vollständig ausgefüllt. Unter diesen gaben 19 Projekte an, dass sie die Verbesserung der Robustheit im Gebäudebetrieb behandeln.

Die Auswertung der Umfrageergebnisse wurde durch die Analysen der Projektinformationen aus den Kurzbeschreibungen der Teilprojekte und weiteren Quellen ergänzt, z. B. Homepages der ausführenden Stellen oder Projektvorstellungen in den Projektforen EnEff.Gebäude.2050. Dabei ergab sich, dass sich fünf weitere Projekte ebenfalls mit dem Thema beschäftigen. Bei acht der 19 Projekte, die im Fragebogen angaben, dass sie die Robustheit behandeln, konnte im Nachhinein nicht nachvollzogen werden, in welcher Form die Robustheit im Projekt thematisiert wird. Somit wurden insgesamt 16 Projekte für die Querauswertung der Forschungsschwerpunkte im Bereich des robusten Gebäudebetriebs analysiert. Aufbauend auf den Analysen zu den Unsicherheitsfaktoren in den oberen Abschnitten können die Projekte Kategorien zugeordnet werden, die beschreiben, um welchen Unsicherheitsfaktor es sich bei dem Projekt bzgl. eines robusten Gebäudebetriebs handelt.

Die Kategorien umfassen die Berücksichtigung

- des Nutzer:Innen-Verhaltens,
- der Vorhersagegüte von Prognosealgorithmen und
- der Fehleranfälligkeit von technischen Komponenten.

Im Folgenden werden die Kernaspekte der drei Kategorien in Bezug auf den robusten Gebäudebetrieb beschrieben und die entsprechenden Projekte zugeordnet. Die Ergebnisse der Querauswertung von 16 Projekten werden in Tabelle 9 zusammenfassend dargestellt und im folgenden Teil im Detail diskutiert.

Tabelle 9: Querauswertungsergebnisse zur Forschung im Bereich robuster Gebäudebetrieb.

FKZ	Verbundvorhaben	Forschungsschwerpunkte	Berücksichtigung des Nutzer:Innen-Verhaltens	Minimierung der Fehleranfälligkeit technischer Komponenten	Optimierung der Vorhersagegüte von Prognosealgorithmen
03EN1004	EnOB: EnergieeffBäder	Entwicklung von Leitlinien zur Entwicklung nachhaltiger/energie-effizienter Schwimmbäder. Ein digitales Referenzschwimmbad wird entwickelt, um den Planungsprozess zu optimieren.	x	x	x
03EN1005	SLIM	Semizentrale Lüftung und intelligentes Betriebsmonitoring.	x	x	
03EN1007	EEBF	Energetische Echtzeitbetriebsführung für Gebäude mit heterogener Haustechnik. Monitoring der TGA. Optimierung des Nutzerkomforts mittels Data Analytics und nichtlinearer modellprädiktiver Regelung.	x	x	x
03ET1371	EnOB: MFGeb	Entwicklung von Methoden zur Fehlerdiagnose im Gebäudebetrieb. Fehleralgorithmen für TGA.		x	
03ET1509	EnOB: InSituNachweis	Agentensysteme zur intelligenten und robusten Steuerung komplexer Energiesysteme in Nichtwohngebäuden als Bestandteil des übergeordneten Energiesystems. Monitoring der TGA zur Optimierung der Inbetriebnahme.	x	x	x
03ET1573	EnOB: FeBOP-MFH	Wärmeversorgung in Mehrfamilienhäusern. Permanente Betriebsoptimierung durch automatische Analyse im Feld.		x	
03ET1610	EnOB: EnaPlanDF	Entwicklung eines allgemeingültigen Planungsleitfadens für natürlich belüftete Doppelfassaden.	x	Low-Tech	
03EN1035	EnOB: EEFH-IO	Modulares Energieversorgungskonzept für Mehrfamilienhäuser mit integriertem EMS.	x		x
03EN1037	EnOB: RLT-Opt	Ganzheitliche Betriebsoptimierung von raumluftechnischen Anlagen. Integration von Monitoringsystemen in bestehende RLT-Anlagen.		x	
03ET1485	MODI	Entwicklung von Betriebsmodis als methodisches Werkzeug für den Entwicklungs- und Realisierungsprozess von Energiesystemen in Gebäuden und Quartieren.	x	x	x

03ET1647	EnOB:KEN-BOP	Korrosionssichere Inbetriebnahme energieoptimierter hydraulischer Systeme.				x
03ET1616	EnOB: Balt-Best	Untersuchung der Betriebsführung von Kesselanlagen hinsichtlich ihrer Effizienz. Einsatz von Nutzerassistenzsystemen und Untersuchung der Wirkzusammenhänge.				x
03ET1621	EnOB: KMUplus	Entwicklung einer modularen Energiemanagementlösung für kleine und mittlere Unternehmen als Mehrwert im Zuge ganzheitlicher digitaler Transformation.			x	
03SBE0006	Solares-Bauen: OOM4ABDO	Objektorientiertes Monitoring als Grundlage für einen effizienteren Betrieb sowie kostengünstige Bestandsoptimierung durch Anwendung von Machine Learning-Techniken				x
03ET1343	Monitoring degewo Zukunftshaus in Berlin	Sanierung eines Zeilenhochhauses mit energetischen Zielen lokaler regenerativer Energiebedarfsdeckung für den Gebäudebetrieb und Einbindung in urbane Strukturen. Forschungsfokus Übertragbarkeit.			x	x
03EGB0003	EG2050: nzeb Hannover	"Nearly Zero Energy School". Entwicklung von Systemstandards und Qualitätsmanagement für Nearly Zero Energy Gebäude am Beispiel des Förderzentrums auf der Bult, Hannover.				x

Von den untersuchten Projekten lassen sich neun identifizieren, die das Verhalten der Nutzer:Innen primär thematisieren und Gebäudebetriebs- sowie Nutzerassistenzsysteme entwickelt haben, um den nutzerabhängigen Betrieb zu optimieren. Der Einsatz solcher Assistenzsysteme sensibilisiert und schult Nutzer:Innen, während Monitoring-Systeme zur Analyse von Temperatur, Komfort und Energieeffizienz genutzt werden. Ein Zusammenspiel von Verhalten der Nutzer:Innen und Technik trägt so zu einem robusten Betrieb bei. Die Querauswertung der Projekte ergab dazu, dass die Minimierung der Fehleranfälligkeit technischer Komponenten von zentraler Bedeutung ist, um die Robustheit von Gebäuden zu optimieren. Dies sollte bereits in der Planungs- und Bauphase sowie im laufenden Betrieb berücksichtigt werden. Monitoring-Systeme erfassen Prozessdaten in Echtzeit und ermöglichen eine schnelle Fehlererkennung. Niedrige technische Komplexität, wie bei Low-Tech-Lösungen, kann zudem die Fehleranfälligkeit und die Wartungskosten reduzieren. Die Vorhersagegüte von Prognosealgorithmen beeinflusst ebenfalls die Robustheit des Betriebs. Hierfür sind präzise Daten und valide Modelle notwendig, die durch kontinuierliches Monitoring und die Anwendung von Machine-Learning-Methoden verbessert werden, wie die Ansätze der Projekte zeigten. Optimierte Regelungsstrategien auf Basis solcher Prognosen können zu einer effizienteren Steuerung des Energieverbrauchs und einem erhöhten Nutzerkomfort führen.

3.4.3.4 Smart Readiness von Demonstrationsgebäuden aus der Förderinitiative EWB

Die Bewertung der Smart Readiness von Demonstrationsgebäuden aus dem Forschungsbereich Energiewendebauen erfolgte in Verbindung mit der geplanten Einführung des Intelligenzfähigkeitsindikators bzw. „Smart Readiness Indicator“ (SRI) aus der europäischen Gebäudeeffizienzrichtlinie (EPBD).

Laut EPBD [92] soll „der Intelligenzfähigkeitsindikator verwendet werden, um die Fähigkeit von Gebäuden zu messen, Informations- und Kommunikationstechnologien sowie elektronische Systeme zur Anpassung des Betriebs der Gebäude an den Bedarf der Bewohner und des Netzes zu nutzen“. Zusätzlich sollte mit Hilfe des Intelligenzfähigkeitsindikators die „Gesamtenergieeffizienz und -leistung der Gebäude“ verbessert werden. Dazu wurde von einem Projektkonsortium im Auftrag der EU-Kommission eine SRI-Bewertungsmethode erarbeitet und ein Tool zur Ermittlung des SRI fertiggestellt. Die Einführung des SRI ist für die EU-Mitgliedsstaaten noch freiwillig und soll für Gebäude mit hohem Verbrauch ab 2026 verpflichtend werden.

Die zur Bewertung geeigneten Forschungsprojekte wurden anhand des Projektclusters und der modulübergreifenden Befragung identifiziert. Das Ziel der Bewertung bestand darin, die EU-Methode des Smart Readiness Indicators zu testen und die ersten Erfahrungen und Erkenntnisse, die mit der Anwendung der Bewertungsmethode gewonnen werden können, zu sammeln und zu dokumentieren. Gleichzeitig wurde auch eine erste Einschätzung der Smart Readiness von EWB-Forschungsprojekten angestrebt.

Insgesamt sieben Demonstrationsgebäude wurden hinsichtlich Smart Readiness bewertet. Bei den Gebäuden handelte es sich um fünf Neubauten und zwei Bestandserweiterungen. Vertreten waren ein Nichtwohngebäude, ein Mischgebäude, drei Wohngebäude und zwei Aufstockungen mit Wohnnutzung (aus dem Solar Decathlon 2022). Die Bewertungsmethode des Smart Readiness Indicators umfasst neun Anwendungsbereiche (Heizung, Warmwasser, Kühlung, Lüftung, Beleuchtung, dynamische Gebäudehülle, Strom, E-Mobilität und Monitoring und Betriebsführung) für die vor allem die Art der eingesetzten Steuerung bzw. Regelung bewertet wird. Bei den ausgewählten Demonstrationsgebäuden werden nahezu alle technischen Bereiche der SRI-Bewertungsmethode abgedeckt.

Die für die Bewertung erforderlichen Informationen wurden in drei Schritten mit Unterstützung der Projektnehmer zusammengetragen und in das Tool eingepflegt. Die drei Schritte waren:

- Identifikation der zutreffenden Anwendungsbereiche (inkl. Abgleich mit den Projektnehmern)
- Detaillierte Abfrage und Auswertung der Informationen zu den jeweils zutreffenden Anwendungsbereichen
- Eingabe der Informationen in ein Excel-Bewertungstool (inkl. finalem Abgleich mit den Projektnehmern)

Auf diese Weise sollte eine möglichst hohe Korrektheit und Vergleichbarkeit der Eingaben bei gleichzeitig möglichst geringem Aufwand für die Projektnehmer gewährleistet werden.

Die Bewertung ergab (dargestellt in Tabelle 10), dass fünf von sieben bewerteten Demonstrationsgebäuden die beiden niedrigsten SRI-Klassen G (< 20 %) und F (< 35 %) erreichen. Zwei der Vorhaben erreichen eine hohe SRI-Punktzahl und damit die Klassen C (71 %) und B (88 %). Die Aufteilung in die SRI-Klassen wird in Abbildung 37 gezeigt.

Tabelle 10: Übersicht über die bewerteten Demonstrationsgebäude mit Darstellung der erreichten SRI-Punktzahlen und der daraus resultierenden SRI-Klassen.

Nr.	Forschungsvorhaben	Gebäudeart	Gebäudetyp	Gesamt-SRI-Punktzahl	SRI-Klasse
1	LLEC-Verwaltungsbau [93]	Neubau: Nichtwohngebäude	Bürokomplex	88 %	B
2	Plus-EQ-Net [94], [95]	Neubau: Mischgebäude	Wohnen	22 %	F
			Gewerbe	19 %	G
3	Campo V [96]	Neubau: Wohngebäude	Wohnheim	18 %	G
4	Eversol-MFH [97]	Neubau: Wohngebäude	Mehrfamilienhaus	26 %	F
5	MFH Möhringen [98]	Neubau: Wohngebäude	Mehrfamilienhaus	18 %	G
6	SDE21-MIMO [99]	Bestandserweiterung	Wohnnutzung	35 %	F
7	SDE21-coLLab [100]	Bestandserweiterung	Wohnnutzung	71 %	C

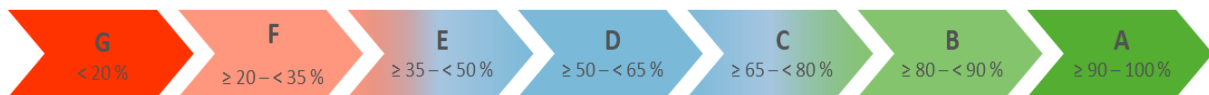


Abbildung 37: Abstufung der SRI-Klassen in Abhängigkeit der Gesamt-SRI-Punktzahl. Quelle: eigene Darstellung.

In Bezug auf die Anwendung des Tools und die erzielten Ergebnisse kann Folgendes zusammengefasst werden:

- Die Bewertung von typischen Standardkonzepten und -technologien im Bereich der Anlagentechnik mit dem Tool ist als nicht kompliziert einzustufen und gut verständlich. Schwierigkeiten ergaben sich bei der Bewertung von weniger typischen Konzepten und beim Einsatz von Technologien, an denen in den Projekten geforscht wird. Bei Vorliegen bzw. bei Kenntnis der erforderlichen Informationen ist die Bewertung selbst mit wenig Aufwand verbunden.
- Die SRI-Bewertung von Demonstrationsgebäuden zeigt, dass die überwiegende Anzahl der bewerteten Objekte nur eine niedrige Gesamt-SRI-Punktzahl erreicht. Anhand der Gesamt-SRI-Punktzahl ist aber nicht ersichtlich, in welchen technischen Bereichen ein bewertetes Objekt smarte Anwendungen hat, inwiefern diese zu hohen Bewertungen führen und welche Bereiche noch ausbaufähig sind. Deswegen sollte die Auswertung von einzelnen technischen Bereichen gestärkt werden.
- Im Rahmen der Bewertung ist außerdem aufgefallen, dass in vielen Bereichen konventionell gesteuert und geregelt wird, obwohl es sich bei den untersuchten Objekten um Forschungsvorhaben handelt. Ggf. sollte untersucht werden, welche Hintergründe das hat und wie die

Umsetzung von smarten Anwendungen im Sinne des SRI vorangetrieben werden kann, damit sich diese als Stand der Technik etablieren.

- Bei einigen Forschungsvorhaben hat sich gezeigt, dass eine smarte Regelung bzw. Steuerung zwar angedacht und geplant war, aber nicht umgesetzt worden ist bzw. die entsprechende Komponente, die eine smarte Regelung ermöglicht hätte, nicht beschafft wurde.
- Im Bereich des Ladens von Elektro-Fahrzeugen hat sich gezeigt, dass bei einigen Forschungsvorhaben die Infrastruktur für die Ladestationen vorgerüstet ist, die Ladestationen selbst aber nicht bzw. noch nicht umgesetzt worden sind.
- Nahezu alle der untersuchten Forschungsvorhaben beinhalten eine Monitoringphase, für die eine entsprechende Monitoringinfrastruktur vorzinstallieren ist. Anhand eines Projekts konnte verglichen werden, welchen Einfluss das Monitoring auf den Smart Readiness Indicator hat. Im Rahmen des Monitorings wurden im Wesentlichen die Erfassung, die Auswertung und die Kommunikation der Daten in den Bereichen Heizung, Trinkwarmwasser und Elektrizität vorgenommen. Werden diese Daten nicht mehr erfasst und als Information zur Verfügung gestellt, reduziert sich die Gesamt-SRI-Punktzahl um die Hälfte (von 18 % auf 9 %). Dabei brechen die technischen Bereiche Heizung, Trinkwarmwasser und Elektrizität deutlich ein. Die beiden technischen Bereiche „Heizung“ und „Elektrizität“ haben dabei die größten Auswirkungen.

Im Rahmen des Ausblicks werden folgende Punkte angesprochen:

- Die Bewertungen zeigen, dass es nicht ausreicht, smarte Anwendungen in einzelnen technischen Bereichen umzusetzen, um eine hohe SRI-Punktzahl zu erreichen. Es müssen dafür smarte Anwendungen in nahezu allen technischen Bereichen vorliegen. Es fällt auf, dass smarte Regelungsansätze im Sinne des SRI sich in vielen Bereichen in Deutschland noch nicht als Stand der Technik etabliert haben.
- Im aktuellen Vorschlag zur SRI-Bewertung ist es vorgesehen, in einem bewerteten Objekt nur die Anlagentechnik bzw. die Steuerung/Regelung zu bewerten, die bereits vorhanden ist bzw. genutzt werden kann. Es ist nicht vorgesehen, vorbereitende Installationen sowie noch nicht umgesetzte Anwendungen, die zu einem späteren Zeitpunkt angekoppelt bzw. ohne Weiteres nachgerüstet bzw. erweitert werden können, zu bewerten. Es darf deshalb die Frage gestellt werden, ob es sich beim Smart Readiness Indicator nicht eher um einen Smartness Indicator handelt. Die HEA-Studie [101] unterbreitet in diesem Zusammenhang den Vorschlag, auch die vorbereitende Infrastruktur für die Erweiterung oder die Nachrüstung von Anwendungen in die Bewertung miteinzubeziehen und mit der Hälfte der „normalen“ Punktzahl zu bewerten. Auf diese Weise lassen sich Gebäude, Gebäudeteile bzw. Gebäudeeinheiten, die für smarte Anwendungen besser vorbereitet sind, von den Objekten, die für solche Anwendungen nicht vorbereitet sind, unterscheiden.
- Es wird festgestellt, dass eine prägnante Dokumentation über die in dem bewerteten Objekt vorhandene Anlagentechnik, Steuerung und Regelung sowie die bereits installierte Infrastruktur als Ergänzung zu einem SRI-Zertifikat unerlässlich ist, wie dies auch in der BMWi-Studie [102] vorgeschlagen wird. Als zweckmäßig wird auch die Darstellung des Verbesserungspotentials gesehen. Es sollen Empfehlungen aufgenommen werden, die aufzeigen, an welcher Stelle bzw. in welchem Bereich smarte Anwendungen sinnvoll und mit geringem Aufwand erweitert bzw. nachgerüstet werden können.
- Bei der SRI-Bewertung liegt ein starker Fokus auf der Regelung und der Steuerung von anlagentechnischen Systemen. Ein weiterer Schwerpunkt der SRI-Bewertung liegt in der Bewertung von vorzulegenden Informationen über die Leistung der Systeme. Diese Erwartungen erfordern unter anderem einen flächendeckenden Einsatz von Sensoren und Aktoren sowie deren Anbindung an die Gebäudeautomation, aber auch an Monitoring-Systeme. Nahezu alle der

untersuchten Forschungsvorhaben beinhalten eine Monitoringphase und wurden bzw. werden entsprechend mit der notwendigen Infrastruktur ausgestattet. So unterstützt der SRI den Aspekt des Gebäudemonitorings, das gleichzeitig zur Betriebsoptimierung genutzt werden kann.

3.4.4 AP 4.4: Integration des Einzelgebäudes in das Gesamtsystem

Im Zuge der Energiewende soll die Energieversorgung weg von einer zentralen, konventionellen Versorgung mit fossilen Brennstoffen hin zu einer dezentralen und sektorgekoppelten Energieversorgung auf Basis regenerativer Energien entwickelt werden. Da der Gebäudesektor für rund 40 % des Endenergieverbrauchs in Deutschland verantwortlich ist, kommt ihm eine zentrale Rolle in diesem Transformationsprozess zu. Um Effizienzpotenziale zu heben und die Energieversorgung systemdienlich zu gestalten, sollten Gebäude daher nicht isoliert betrachtet werden, sondern als integraler Bestandteil eines vernetzten Energiesystems. Dies ermöglicht eine optimierte Bedarfsdeckung und trägt zur Entlastung und Effizienzsteigerung der Versorgungsnetze bei.

Das Ziel dieses Arbeitspakets ist es, die Wechselwirkungen zwischen Gebäudeenergiesystemen und übergeordneten Energiesystemen zu untersuchen und darauf aufbauend optimierte netzdienliche Gebäudeenergiesysteme für ausgewählte typische Gebäude in Deutschland zu entwickeln. Das Arbeitspaket wurde maßgeblich vom Projektpartner RWTH EBC bearbeitet. Fraunhofer IBP unterstützte bei der Organisation eines Workshops zum Thema Netzdienlichkeit und der Entwicklung von Fragen zur Netzdienlichkeit für die Projektbefragung. Gemeinsam mit Fraunhofer ISI wurden die Rahmenbedingungen zur Netzdienlichkeit für die Szenarienentwicklung im AP 4.5 erarbeitet.

Ziele des Arbeitspakets

- Entwicklung einer Definitionsmatrix zur Bestimmung der Netzdienlichkeit
- Untersuchung von Flexibilitäts- und Speicheroptionen im Gebäudebereich
- Analyse möglicher netzdienlicher Gebäudekonzepte
- Entwicklung einer Methodik zur quantitativen Bewertung diverser netzdienlicher Gebäudekonzepte aus verschiedenen Perspektiven
- Ermittlung ökologisch und ökonomisch optimierter netzdienlicher Energiesysteme für typische Wohn- und Nichtwohngebäude in Deutschland
- Bewertung typischer netzdienlicher Gebäudekonzepte in den Forschungsprojekten mittels der entwickelten Bewertungsmethodik

Methoden

- Literaturrecherche zu Definitionen und Bewertungsmethoden der Netzdienlichkeit im Gebäudebereich
- Querauswertung von Flexibilitäts- und Speicheroptionen sowie netzdienlichen Gebäudekonzepten aus der Forschung
- Abstimmung der Erkenntnisse und Austausch mit den Forschungsprojekten über Fragebögen und während des Workshops beim Projektetreffen
- Modellbasierte Darstellung und Bewertung netzdienlicher Gebäudekonzepte mithilfe eines Optimierungsmodells

Ergebnisse:

- Definitionsmatrix zur Netzdienlichkeit:
 - Der Begriff „netzdienliches Gebäude“ umfasst ein breites Spektrum an Eigenschaften und Zielen, weshalb für eine umfassende quantitative Bewertung der Netzdienlichkeit eine Vielzahl an Indikatoren aus verschiedenen Perspektiven erforderlich ist.
- Mögliche Flexibilitäts- und Speicheroptionen im Gebäudebereich:
 - Im Mittelpunkt der technischen Optionen für ein netzdienliches Gebäudekonzept stehen thermische und Photovoltaikanlagen (häufig in Kombination mit Stromspeichern). Das netz-

dienliche Potenzial von Flexibilitäts- und Speicheroptionen hängt von verschiedenen Faktoren ab, wie installierten Leistungen/Kapazitäten, Energiebedarfscharakteristiken der Gebäude, der Zusammensetzung und den Betriebsstrategien des Gebäudesystems.

- Netzdienliche Gebäudekonzepte in der Forschung und mögliche Forschungslücken in diesem Bereich:
 - Die untersuchten netzdienlichen Gebäudekonzepte in den analysierten Forschungsprojekten konzentrieren sich auf den Einsatz in bestehenden Wohngebäuden und auf den strompreisgeführten Betrieb der Gebäudeenergiesysteme. Das Hauptziel des Gebäudebetriebs ist die Maximierung der Eigenstromverbrauchsquote.
 - Ein möglicher Forschungsbedarf im Bereich netzdienlicher Gebäude besteht in der Entwicklung von Ansätzen zur Quantifizierung der zeitlichen Stromnetzanforderungen sowie der Entwicklung von Anreizen zur Sicherstellung netzdienlicher Auswirkungen vom kostenmierten Betrieb der Gebäudeenergiesysteme
- Optimierte netzdienliche Energiesysteme für typische Wohn- und Nichtwohngebäude in Deutschland:
 - Die optimierten netzdienlichen Energiesysteme der untersuchten typischen Gebäude in Deutschland unterscheiden sich voneinander, und die netzdienliche Performance der Gebäudeenergiesysteme hängt hauptsächlich vom Potenzial der lokalen Stromerzeugung sowie von der Gleichzeitigkeit von Strombedarf und -erzeugung ab.
- Relative Wirtschaftlichkeit, Umweltfreundlichkeit und Netzdienlichkeit typischer netzdienlicher Gebäudekonzepte in der Forschung:
 - Aus den bewerteten typischen netzdienlichen Konzepten für Mehrfamilienhäuser in den Forschungsprojekten zeigt anhand der modellbasierten Analyse das Gebäudeenergiesystem, bestehend aus einem BHKW, einer Wärmepumpe, einer PV-Anlage, einem Warmwasserspeicher und einer Batterie, die geringsten Emissionen, während die Unterschiede bei den Kosten und der Netzdienlichkeit im Vergleich zu anderen Konzepten sehr gering sind.

Im ersten Schritt hat das BF-Modul II durch Literaturrecherchen, die Querauswertung von Projektansätzen sowie die Spiegelung der Zwischenergebnisse mit Expert:Innen aus den Forschungsprojekten im Rahmen von Veranstaltungen und Fragebögen der Wissenschaftlichen Begleitforschung die Erkenntnisse zur Netzdienlichkeit zusammengefasst und damit die Grundlagen für die Arbeit geschaffen. Im Mittelpunkt dieser Grundlagenarbeit standen die Definitionen und Bewertungsmethoden der Netzdienlichkeit sowie Flexibilitäts- und Speicheroptionen als technische Bausteine zur Ermöglichung eines flexiblen Stromverbrauchs und netzdienlicher Gebäudekonzepte. Die Erkenntnisse dieser qualitativen Analysen sind in die modellbasierten forschenden Analysen eingeflossen, um typische netzdienliche Ansätze abzubilden, qualitativ zu bewerten und optimierte netzdienliche Gebäudekonzepte für typische Gebäude in Deutschland zu ermitteln.

Im Folgenden werden die Aktivitäten und Ergebnisse zum Thema Netzdienlichkeit von BF-Modul II vorgestellt.

3.4.4.1 Definitionsmatrix Netzdienlichkeit

Eine Voraussetzung zur Entwicklung netzreaktiver Gebäudekonzepte ist eine klare Definition von Netzdienlichkeit. Es fehlt jedoch weiterhin eine einheitliche Definition und Quantifizierung der Netzdienlichkeit. Um diese Lücke zu schließen, wurde als Grundlage für die Arbeiten in diesem Arbeitspaket eine Definitionsmatrix zur Netzdienlichkeit entwickelt, welche auf einer umfangreichen Recherche zu Definitionen systemdienlicher Gebäude basiert. Diese Untersuchung hat das Ziel, ein fundiertes Verständnis der Bewertungskriterien von Gebäudeenergiesystemen im Hinblick auf ihre Netzdienlichkeit zu entwickeln. Dabei zeigte sich, dass die Interaktion zwischen Einzelgebäuden und dem Stromnetz im Zentrum der Netzdienlichkeit steht, während das Wärme- und Gasnetz aufgrund der geringeren Anforderungen an Energieflexibilität weniger Aufmerksamkeit erhält. Daher lag der Fokus dieses Arbeitspakets auf den Interaktionen zwischen Gebäudeenergiesystemen und dem Stromnetz.

Bei der Analyse der Definitionen und Bewertungsperspektiven wurde festgelegt, dass die entscheidenden Eigenschaften eines Gebäudeenergiesystems im Sinne von Netzdienlichkeit grundsätzlich in zwei

Kategorien eingeteilt werden können: die Betriebsweisen des Gebäudesystems und deren Auswirkungen auf das Stromnetz.

Eine häufig in der Forschung untersuchte Betriebsweise ist der netzsignalgeführte Gebäudebetrieb [103, 104, 105]. Entsprechend der netzdienlichen Ziele können diverse Netzsignale als Führungsgröße des Gebäudebetriebs eingeführt werden. Mögliche Netzsignale zur Verschiebung der Lasten in die lastschwachen Zeiträume können EPEX-Day-Ahead-Preise und Residuallasten² sein. Für ein emissionsarmes Stromverbrauchsverhalten können der Anteil von Wind- und Photovoltaik-Energie im Strommix oder der CO₂-Faktor des Strommixes als Netzsignal dienen [103]. Die Auswahl der Netzsignale hängt vom jeweiligen Bilanzkreis im Stromnetz ab, wodurch die Netzbedürfnisse auf verschiedenen Netzebenen repräsentiert werden können. Einige Quellen nehmen eine lokale Stromerzeugung auf Gebäudeebene an und diskutieren eine hohe Deckung der Last durch lokale Erzeugung. Dieses Verhältnis wird über spezifische Indikatoren, wie bspw. den Load Match Index, bewertet [106, 103]. Darüber hinaus werden die Spitzenlasten im Stromnetz als ein wichtiges Signal für die Wahrscheinlichkeit von Netzengpässen und den Netzausbaubedarf angesehen. Somit wird die Begrenzung bzw. Reduktion der Spitzenlasten von Gebäuden in einigen Studien als einer der netzdienlichen Aspekte in Betracht gezogen und Indikatoren zur Bewertung entwickelt [106, 103].

Die möglichen Auswirkungen netzdienlicher Gebäude auf das Stromnetz sind aufgrund unterschiedlicher Perspektiven und Interpretationsschwierigkeiten heterogen. Grundlegend lassen sie sich in die Kategorien Wirtschaftlichkeit, Umweltverträglichkeit und Versorgungssicherheit unterteilen. Im Bereich der wirtschaftlichen Stromerzeugung und -versorgung werden abstrakte Auswirkungen wie die Deckung der Nachfrage mit minimalen volkswirtschaftlichen Kosten, hohe Erlöse beim Stromverkauf und die Steigerung der Markteffizienz als Ziele netzdienlicher Gebäude vorgeschlagen. Für das Ziel, den Anteil erneuerbarer Energien bei der Bedarfsdeckung zu erhöhen, werden konkretere Maßnahmen wie der Betrieb von Gebäuden nach dem EE-Anteil im Strommix identifiziert [103]. Im Hinblick auf die Versorgungssicherheit bei zunehmendem Ausbau erneuerbarer Energien erfordern die angestrebten Auswirkungen eine detaillierte Betrachtung und Interpretation auf der Gebäudeebene [103, 107]. Die aus der Literaturrecherche identifizierten Ziele, Mehrwerte und Eigenschaften eines netzdienlichen Gebäudes sind in Tabelle 11 zusammengefasst und die wichtigsten Eigenschaften werden fett markiert.

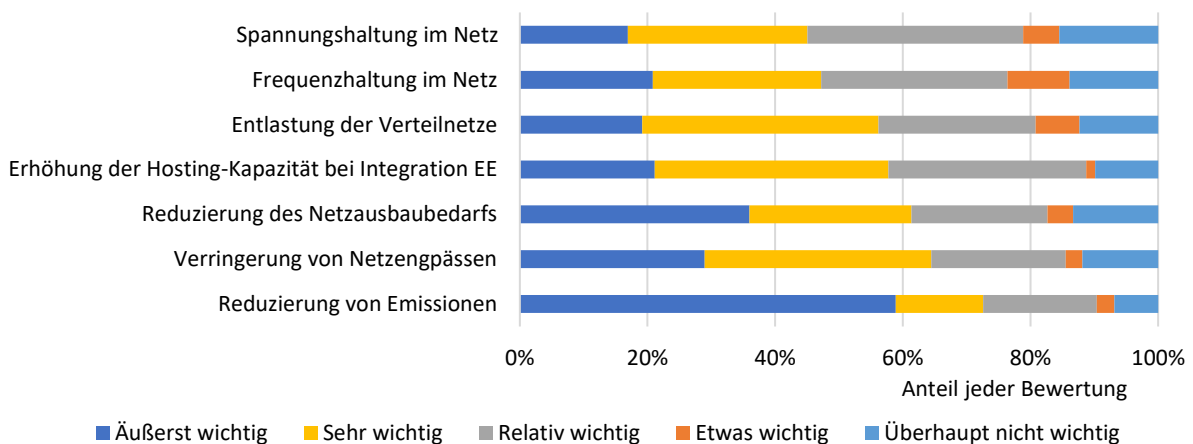
²Bei dem Begriff Residuallast handelt es sich um die Last, die nach Abzug angebotsabhängig einspeisender erneuerbarer Energien verbleibt und durch steuerbare gesicherte Leistung erbracht werden muss [186].

Tabelle 11: Definitionsmatrix von Netzdienlichkeit im Gebäudebereich.

Ziele, Mehrwerte und Eigenschaften eines netzdienlichen Gebäudes		
Betriebsweise des Gebäudeenergiesystems	Auswirkungen auf das Stromnetz (aufgeteilt in drei Perspektiven)	
Hohe Übereinstimmung der lokalen Erzeugung und Last	<i>Wirtschaftlichkeit</i>	Abdeckung der Nachfrage mit volkswirtschaftlich minimalen Kosten
		Hohe Erlöse beim Stromverkauf
		Erhöhung der (Markt-)Effizienz der Stromversorgung
Anpassung des Strombezuges an die Stromsignale	<i>Umweltverträglichkeit</i>	Reduzierung der Emissionen beim Stromverbrauch
Spitzenlastbegrenzung/-reduktion	<i>Versorgungssicherheit</i>	Verringerung von Netzengpässen
		Reduzierung des Netzausbaubedarfs
		Entlastung der Verteilnetze

Die gesammelten Ziele, Mehrwerte und Eigenschaften eines netzdienlichen Gebäudes wurden durch Forschungsprojekte hinsichtlich ihrer Wichtigkeit bewertet. Diese Bewertung erfolgte unter anderem durch die modulübergreifende Befragung im Jahr 2021. In Tabelle 12 wird die Auswertung der Expertenmeinungen zur Wichtigkeit gezielter Auswirkungen eines netzdienlichen Gebäudes auf das Stromnetz dargestellt. Daraus stellte sich eine effiziente und emissionsarme Stromversorgung als Hauptziel eines netzdienlichen Gebäudes heraus. Danach folgte die Verringerung von Netzengpässen und damit die Reduzierung des Netzausbaubedarfs.

Tabelle 12: Auswertung BF-Fragebogen: Meinung der Forschungsprojekte zu möglichen Auswirkungen auf das Stromnetz eines netzdienlichen Gebäudes (Anzahl der Antworten: 77)



Die Spiegelung der Erkenntnisse aus der Definitionsmatrix und Auswertung vom Fragebogen erfolgte im Rahmen eines Workshops beim 11. Projektetreffen der Wissenschaftlichen Begleitforschung EWB [108]. Im Rahmen des Workshops wurden die gesammelten Ziele, Mehrwerte und Eigenschaften eines netzdienlichen Gebäudes bewertet. Die dabei identifizierten wichtigsten Eigenschaften sind in Tabelle

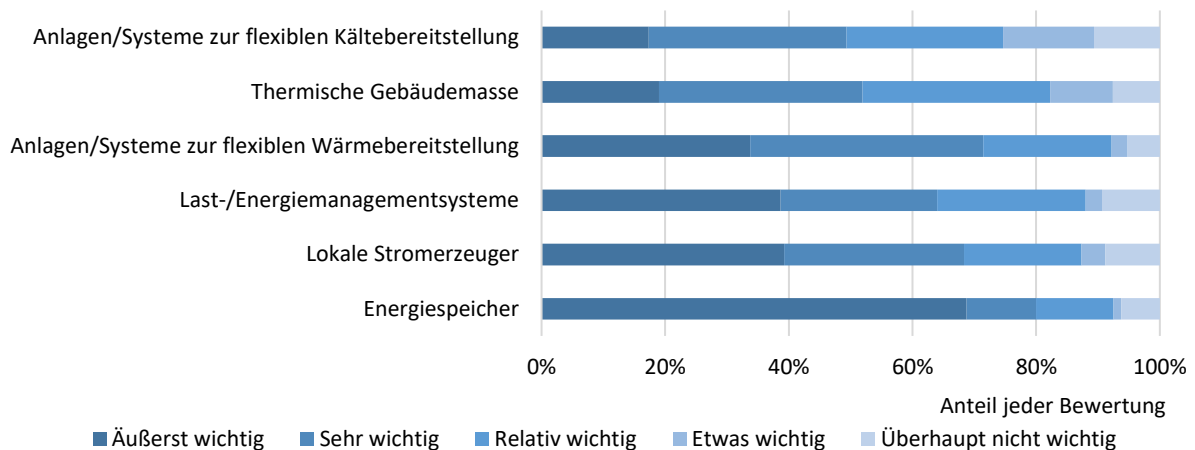
11 fett markiert. Besonders hervorgehoben wurde die Anpassung des Gebäudesystems an Strommarktsignale, insbesondere die Reaktion auf Börsenstrompreise, als entscheidende Eigenschaft netzdienlicher Gebäude. Ein Problem, das dabei identifiziert wurde, besteht in der begrenzten Verfügbarkeit variabler Strompreise für Kleinstromverbraucher. Zudem wurde darauf hingewiesen, dass einfache Lastverschiebungen durch einheitliche Signale zu Gleichzeitigkeitswirkungen bei niedrigen Strompreisen führen können. Daher könnten alternative Signale für netzdienliche Stromnutzung erforderlich sein, wie beispielsweise Signale aus lokalen Strommärkten. Die reine Maximierung der Eigenstromnutzung sollte nicht zwangsläufig netzdienliche Auswirkungen haben, vielmehr sollten die Bedingungen im Stromnetz als vorrangige Referenz für den Gebäudebetrieb betrachtet werden. Als wichtigste Soll-Auswirkungen netzdienlicher Gebäude wurden die Ziele in der Kategorie Versorgungssicherheit bewertet. Dies stimmte mit den Ergebnissen der Projektabfrage überein. Darauf folgte die kostengünstige Deckung der Stromnachfrage. Positive Effekte netzdienlicher Gebäude sollten den Ausgleich von Stromversorgungsschwankungen, den Beitrag zur Integration erneuerbarer Energien und die Senkung der Gesamtemissionen durch flexiblen Strombezug umfassen. Im Rahmen des Workshops wurden dazu die Voraussetzungen für die Umsetzung netzdienlicher Gebäude gesammelt und diskutiert, ob und wann diese in den Bereichen Wissensgrundlage, Technologieverfügbarkeit und regulatorische Rahmenbedingungen gegeben sind bzw. werden könnten. Die Erkenntnisse daraus sind als Grundlagen in die Entwicklung der Szenarien im AP 4.5 eingeflossen.

3.4.4.2 Technische Bausteine von netzdienlichen Gebäudekonzepten

Zur Umsetzung eines Gebäudekonzeptes mit den identifizierten netzdienlichen Eigenschaften sind technische Einheiten mit Flexibilitätspotenzialen von großer Bedeutung. Aus der Literaturrecherche ging hervor, dass Flexibilitäts- und Speicheroptionen die technischen Bausteine zur Ermöglichung der Netzdienlichkeit im Gebäudebereich sind. Flexibilitätsoptionen sind technische Einheiten, die die Fähigkeit besitzen, das elektrische Last- oder Einspeiseverhalten in Abhängigkeit von einer übergeordneten Zielstellung anzupassen [109]. Dazu gehören unter anderem lokale Stromerzeuger (Photovoltaikanlagen, Blockheizkraftwerke, Windkraftanlagen und Brennstoffzellen) und Power-to-X-Anlagen (Wärmepumpen, Elektroerhitzer und Elektrolyseure). Darüber hinaus könnten Elektroautos bei möglichem flexiblem Laden eine Flexibilitätsoption darstellen. Zu den Speicheroptionen im Gebäudebereich zählen thermische Speicher wie Warmwasserspeicher und Pufferspeicher, Batterien sowie Wasserstoffspeicher. Eine besondere Speichermöglichkeit stellt die thermische Gebäudemasse dar. Der tatsächliche Beitrag dieser Optionen zur Netzdienlichkeit hängt jedoch von unterschiedlichen Faktoren ab, wie den installierten Leistungen bzw. Kapazitäten, den Grundlasten der Gebäude und der Zusammensetzung des Gebäudesystems. Unter anderem spielen auch die Betriebsstrategien, bei denen die dynamischen Netzanforderungen berücksichtigt werden, eine entscheidende Rolle. In der Analyse von BF-Modul II wurden Last- und Energiemanagementsysteme mit dieser Fähigkeit als unerlässliche Komponente in einem netzdienlichen Gebäude verstanden.

Im Rahmen der modulübergreifenden Projektbefragung im Jahr 2021 wurden die Meinungen der Projekte zur Wichtigkeit verschiedener technischer Optionen zur Gestaltung netzdienlicher Gebäudeenergiesysteme erhoben. In Tabelle 13 werden die Auswertungen der Antworten zu dieser Meinungsfrage dargestellt. Daraus ist ersichtlich, dass Wärmespeicher, Last-/Energiemanagement, lokale Stromerzeuger und flexible Wärmebereitstellung als besonders wichtig bewertet wurden.

Tabelle 13: Auswertung BF-Fragebogen: Meinung der Forschungsprojekte zu technischen Optionen zur Gestaltung netzdienlicher Gebäudeenergiesysteme (Anzahl der Antworten: 80).



Darüber hinaus wurden die technischen Optionen, die in den Forschungsprojekten untersucht wurden, analysiert. Die Ergebnisse sind in Tabelle 14 zusammengestellt. Als Datengrundlagen wurden die Ergebnisse der Projektbefragung aus dem Jahr 2021, die Informationen der Kurzbeschreibungen der Teilprojekte aus dem Internetportal EnArgus sowie ergänzende Projektbeschreibungen aus weiteren Quellen, z. B. Homepages der ausführenden Stellen oder Projektvorstellungen in den Projektforen EnEff.Gebäude.2050, genutzt. Aus dieser Querauswertung geht hervor, dass thermische Speicher als Speicheroption und Photovoltaikanlagen (häufig in Kombination mit Stromspeichern) als Flexibilitätsoption für die lokale Stromerzeugung im Mittelpunkt der Untersuchungen standen. Zudem wurden Betriebsstrategien, die Netzanforderungen berücksichtigen, als zentral für die Netzdienlichkeit bewertet. Diese Erkenntnisse stimmen mit den in der oben genannten Befragung geäußerten Expertenmeinungen überein.

Tabelle 14: Querauswertung zu den Flexibilitäts- und Speicheroptionen in den Forschungsprojekten³

Flexibilitäts-/ Speicheroptionen		Anzahl Projekte	Forschungsschwerpunkte der Projekte
Lokaler Stromerzeuger	Photovoltaik (PV)	42	<u>Umsetzung neuartiger PV</u> : gebäudeintegrierte PV (BIPV) und organische PV (OPV); <u>In 16 aus den 42 Projekten</u> : PV in der Kombination mit Wärmepumpen (WP) und thermischen Energiespeichern (TES).
	Blockheizkraftwerk (BHKW)	5	<u>In 3 der 5 Projekte</u> : BHKW in der Verbindung mit WP, ggf. ergänzt durch Solarkollektoren über intelligentes IT-System für Wärmeversorgung; Einsatz von Biogas als Brennstoff für BHKW; Nutzung der Abwärme aus BHKW zur Kältebereitstellung.

³ Zum Zeitpunkt der Querauswertung wurden Modul II insgesamt 204 Projekte in Erstzuordnung zugeteilt, für diese Querauswertung berücksichtigt.

	Windkraftanlage (WKA)	4	WKA mittels Power-to-Heat in einem Anlagenverbund mit diversen Wärmespeichern zur Gestaltung eines netzdienlichen Wohngebäudes. Entwicklung von einem Optimierungsmodul zur angebots- und bedarfsgerechten Zuschaltung von Energieträgern (wie z. B. Strom aus WKA).
	Brennstoffzelle (BZ)	1	Einsatz von BZ zur Rückverstromung von grünen Wasserstoff.
Power-to-X	Wärmepumpe (WP)	43	<u>In 34 aus den 43 Projekten:</u> lokale Integration von EE als Strom- oder Wärmequelle für WP (PV, Solarkollektoren, Geothermie, Abwasser/-wärme); <u>In 28 aus den 43 Projekten:</u> TES zur Speicherung der Wärme aus WP; <u>In 20 aus den 43 Projekten:</u> Einsatz von WP als Wärmeerzeuger von Niedertemperaturheizsystemen (Fußboden-/Wandheizung).
	Elektrolyseur	1	Einsatz von Elektrolyseur zur Umwandlung grünen Stroms aus PV in Wasserstoff für eine höhere Eigenverbrauchsquote.
Speichermöglichkeit	Thermischer Energiespeicher (TES)	60	<u>Umsetzung neuartiger TES:</u> Sorptionspeicher, Feststoffspeicher und Speicher mit Phasenwechselmaterialien (PCM); <u>In 42 aus den 60 Projekten:</u> TES in Verbindung mit erneuerbaren Wärmequellen (Solarkollektoren, Geothermie und Abwärme).
	Batterie (BAT)	23	Einsatz von BAT zur Speicherung des PV-Stroms.
	Wasserstoffspeicher	2	Zur (saisonalen) Speicherung von Wasserstoff aus Elektrolyseur.
	Gebäudemasse	7	Thermische Aktivierung der thermischen Gebäudemasse zur Speicherung von Wärme oder Kälte.
Elektro-Auto		1	Entwicklung eines netzdienlichen Lastmanagementkonzepts für Ladepunkte in Gewerbegebäuden.
Last-/Energiemanagementsystem		34	Entwicklung von Betriebsstrategien für Gebäudesysteme unter Berücksichtigung der Netzanforderungen durch Lastverschiebung, wie z. B. ein netzsignalgeführter Betrieb.

3.4.4.3 Netzdienliche Gebäudekonzepte in der Forschung

Neben der Querauswertung zur Untersuchung einzelner Flexibilitäts- und Speicheroptionen hat BF-Modul II auch netzdienliche Gebäudekonzepte im Rahmen der Forschungsinitiative EWB analysiert. Als Datengrundlage zur Identifizierung von Projekten, die netzdienliche Konzepte untersuchen und das gesamte Gebäudesystem als Betrachtungsbilanzgrenze haben, dienten die gleichen Datenquellen wie für die Querauswertung zu Flexibilitäts- und Speicheroptionen: hauptsächlich die Kurzbeschreibungen der Teilprojekte aus dem Internetportal EnArgus, der Fragebogen aus dem Jahr 2021 sowie die Homepages der ausführenden Stellen und Abschlussberichte von abgeschlossenen Projekten. Im Fragebogen wurde abgefragt, ob und wenn ja, welche netzdienlichen Konzepte zur Integration des Einzelgebäudes ins übergeordnete Energiesystem in den Projekten entwickelt wurden. Insgesamt konnten 16 von 137 Verbundvorhaben identifiziert werden, die systemische, netzdienliche Ansätze im Gebäudebereich untersuchen.

Bei der Querauswertung wurde eine umfangreiche Analyse der Anwendungsbereiche (Gebäudetyp, Neubau oder Bestandsgebäude), der eingesetzten Flexibilitäts- und Speicheroptionen sowie der Gebäudebetriebsstrategien durchgeführt. Darüber hinaus wurden die erzielten netzdienlichen Auswirkungen der Projekte mit den untersuchten Ansätzen überprüft. Für diese umfassende Querauswertung lagen ausreichende Informationen für insgesamt elf der 16 Verbundvorhaben vor. Die vollständigen Querauswertungsergebnisse wurden im Rahmen eines Berichts auf der EWB-Seite veröffentlicht [6].

Aus der Querauswertung ging hervor, dass der Hauptanwendungsbereich der netzdienlichen Ansätze in der Forschung Bestands-Mehrfamilienhäuser ist. In Bezug auf die Gebäudeenergiesysteme wird häufig der kombinierte Einsatz von PV-Anlagen zusammen mit BHKW und/oder Wärmepumpen untersucht. Es gibt eine Vielzahl von verwendeten Speicheroptionen in den Projekten, darunter typische Warmwasserspeicher und Batterien, aber auch thermische Gebäudemassen und Wasserstoffspeicher. Bei den Gebäudebetriebsstrategien konzentrieren sich die meisten Projekte auf eine prognosebasierte optimierte Regelung der Anlagentechniken. Dabei werden hauptsächlich Börsenstrompreise als Signale für die Betriebsführung genutzt, um die dynamischen Netzzustände zu berücksichtigen. Die Analyse der gezielten Auswirkung auf das Stromnetz zeigt, dass die Maximierung des Eigenstromnutzungsanteils das vorherrschende netzdienliche Ziel ist. Bei der Bewertung der Netzdienlichkeit sollen jedoch neben der Eigenstromnutzung auch andere Teilaspekte, wie Lastspitzen, Flexibilität und die resultierenden Netzsituationen, einbezogen werden. Eine Untersuchung der durch den Gebäudebetrieb verursachten Netzsituationen wird aber nur in einem Projekt behandelt. Die ermittelten Forschungsschwerpunkte zu netzdienlichen Gebäudekonzepten wurden mit BF-Modul III hinsichtlich des Fokus für die Thematik im Bereich Quartiersprojekte gespiegelt. Daraus ergab sich, dass die Schwerpunkte von netzdienlichen Konzepten auf Gebäude- und Quartiersebene ähnlich waren.

Der Dialog mit Forschungsprojekten und die Querauswertung netzdienlicher Gebäudekonzepte weisen auf zukünftigen Forschungsbedarf im Bereich der Netzdienlichkeit hin. Es besteht die Notwendigkeit, Gebäudekonzepte zu entwickeln, die lokale und dynamische Stromnetzanforderungen berücksichtigen und deren Auswirkungen auf das Stromnetz kontinuierlich überprüfen. Bei der Bewertung der netzdienlichen Auswirkungen sollten verschiedene Aspekte wie Lastspitzen, Flexibilität und der Anteil erneuerbarer Energien bei der Bedarfsdeckung berücksichtigt werden, um die Integration erneuerbarer Energien zu fördern und die Netzstabilität zu verbessern. Derzeit konzentrieren sich die meisten Projekte auf bestehende Gebäude und verwenden prognosebasierte Optimierungen, um die Eigenstromnutzung zu maximieren. Jedoch führt die reine Maximierung der Eigenstromnutzung nicht zwangsläufig zu netzdienlichen Auswirkungen, wie aus Diskussionen mit Expert:Innen hervorgeht. Um diese Diskrepanz zu überbrücken, sollten Ansätze zur Quantifizierung zeitlicher Stromnetzanforderungen entwickelt werden. Dafür sind Anreize erforderlich, um sicherzustellen, dass bei dem resultierenden Gebäudebetrieb die Stromnetzanforderungen berücksichtigt werden.

Die Erkenntnisse aus der Grundlagenarbeit dieses Arbeitspakets wurden sowohl bei modulinternen und modulübergreifenden Treffen mit anderen Arbeitspaketen, anderen BF-Modulen und dem PtJ ausgetauscht, bei Projektetreffen den Forschungsprojekten gespiegelt als auch in einem Bericht [6] für ein breites Publikum veröffentlicht.

3.4.4.4 Modellbasierte Analysen

Ein zentrales Ziel in AP 4.4 war die Entwicklung von modellbasierten Ansätzen zur quantitativen Bewertung netzdienlicher Gebäudekonzepte aus verschiedenen Perspektiven (bspw. Betriebskosten, Emissionen und Netzabhängigkeit) und darauf aufbauend die Ermittlung optimierter netzdienlicher Gebäudekonzepte für in Deutschland typische Wohn- und Nichtwohngebäude. Hierfür dienten die ermittelten Erkenntnisse aus der Grundlagenarbeit zu den Eigenschaften und Bewertungsmethoden eines netzdienlichen Gebäudes sowie den technischen Grundlagen, d. h. den Flexibilitäts- und Speicheroptionen, als Grundlage bei der Entwicklung der Modelle für eigene forschende Analysen.

Optimierungsmodell zur quantitativen Bewertung netzdienlicher Gebäudekonzepte

Zur Bewertung netzdienlicher Gebäudekonzepte, welche aus einem Gebäudeenergiesystem mit Flexibilitäts- und Speicheroptionen sowie einer flexiblen Betriebsstrategie bestehen, wurde ein Optimierungsmodell entwickelt. Das Optimierungsmodell basiert auf einem MILP-Modell (Mixed-Integer Linear Program) von Thomas Schütz [110], welches zur Entwicklung optimierter Sanierungsmaßnahmen für Wohngebäude konzipiert wurde. Dieses Modell berücksichtigte sowohl die optimierte Auslegung von Gebäudeenergiesystemen als auch Dämmmaßnahmen an der Gebäudehülle. Die Integration von Dämmmaßnahmen in das MILP-Modell erfolgte gebäudeseitig mittels eines Low-Order-Modells, basierend auf der DIN V 18599, das die Bedarfsprofile für die Raumwärme stündlich ermittelte. Dieses Modell bildet das dynamische thermische Verhalten des Gebäudes durch Berücksichtigung bautechnischer Eigenschaften (wie z. B. die U-Werte der Fassaden), Raumnutzungsbedingungen, Wetterbedingungen und gewünschter Raumtemperaturen mittels linearer Gleichungen ab. Es umfasst eine Variable für die thermische Kapazität des Gebäudes und fünf thermische Widerstände, die die Wärmeübertragung zwischen dem Gebäude und seiner Umgebung darstellen, und wird daher als 5R1C-Modell bezeichnet. In den Arbeiten innerhalb AP 4.4 wurde das im Basismodell implementierte 5R1C-Modell ebenfalls verwendet, um die Speicherkapazitäten der thermischen Gebäudemasse zu berücksichtigen. Für jedes untersuchte Gebäude wurde für jede thermische Zone ein 5R1C-Modell implementiert. Der thermische Bedarf eines Gebäudes ergab sich aus der Summe der Bedarfe aller Zonen zu jedem Zeitpunkt. Da die Dämmmaßnahmen nicht der Fokus der Untersuchung in diesem Arbeitspaket waren, waren die bautechnischen Eigenschaften der Gebäude keine variablen Elemente im Optimierungsmodell, sondern vordefinierte Parameter.

Das Gebäudemodell wurde auf vier geometrisch und bautechnisch für Deutschland typische Wohn- und Nichtwohngebäude angewendet und in dem Optimierungsmodell integriert: ein Einfamilienhaus, ein Mehrfamilienhaus, ein Bürogebäude und ein Schulgebäude. Die Parametrierung der Gebäudegeometrie und der Aufteilung in thermische Zonen basiert auf erhobenen Daten in [111] und [112] zum Wohn- und Nichtwohngebäudebestand in Deutschland. Für die Aufstellung der 5R1C-Modelle werden die bautechnischen Eigenschaften der Gebäude benötigt, die in dieser Arbeit aus der TEASER-Datenbank [113] für die entsprechenden Baujahrklassen entnommen werden. Die detaillierten Metadaten zu den Gebäuden können Tabelle 15 entnommen werden.

Tabelle 15: Übersicht der betrachteten typischen Gebäude

Gebäudetyp	Einfamilienhaus	Mehrfamilienhaus	Bürogebäude	Schule
Baujahr	1970, Standard saniert anhand [111]	1970, Standard saniert anhand [111]	1990	1990
Nutzfläche in m ²	150	540	1970	5000
Dachfläche in m ²	100	180	590	2600

Die Abbildung unterschiedlicher Betriebsweisen und Gebäudeenergiesysteme erfolgte durch Variationen der Zielfunktionen und Nebenbedingungen des MILP-Modells. Untersucht wurden vor allem netzsignalgeführte Gebäudebetriebe. Als Netzsignale wurden variable Strompreise, welche auf Börsenstrompreisen basierten, und dynamische CO₂-Faktoren des Strommixes angewendet. Diese beiden Netzsignale konnten dazu beitragen, dass die Netzanforderungen auf nationaler Ebene berücksichtigt wurden. Zusammen mit der Zielfunktion zur Minimierung der Stromkosten oder der Jahresbetriebsmissionen konnte ein strompreis- bzw. ein CO₂-Faktor-geführter Gebäudebetrieb abgebildet werden. Durch Anpassung der Modelleinstellungen, wie z. B. Einstellungen zu den Zeitpunkten des Vollladens und der Ladeleistung der Elektroautobatterie, konnten verschiedene Ladestrategien von Elektroautos abgebildet werden. Im Modell wurde eine Reihe von anlagentechnischen Optionen modelliert: Gaskessel, Biogas-Blockheizkraftwerke, Wärmepumpen, Elektroerhitzer, Photovoltaikanlagen, Solarthermianlagen, Batterien, Warmwasserspeicher und Elektroautos. Berücksichtigt wurden dazu die Randbedingungen der angeschlossenen Wärme-, Strom- und Gasnetze (bspw. Arbeitspreise, Einspeisevergütung und Begrenzungen der Lastspitzen wegen der Anschlusskapazitäten).

Die Ergebnisse der Betriebsoptimierung wurden analysiert, um unterschiedliche netzdienliche Gebäudekonzepte multiperspektivisch zu vergleichen. Hierbei wurden die Wirtschaftlichkeit, Umweltfreundlichkeit und Netzdienlichkeit ermittelt. Für die Bewertung der Wirtschaftlichkeit dienten die annualisierten Kosten⁴ des Gebäudeenergiesystems und für die Umweltfreundlichkeit die Jahresbetriebsmissionen aufgrund des Verbrauchs von verschiedenen Endenergieträgern, wie Strommix und Biogas. Aus den Analysen in Kapitel 3.4.4.1 zu Definitionen der Netzdienlichkeit ergab sich ein weites Spektrum von Eigenschaften und Zielen eines netzdienlichen Gebäudes. Vor diesem Hintergrund sollte sich eine umfangreiche quantitative Bewertung der Netzdienlichkeit nicht auf eine einzige Größe, sondern auf eine Reihe von Indikatoren beziehen. Zu den Teilaspekten, die bei der Bewertung der Netzdienlichkeit auf unterschiedlichen Systemebenen berücksichtigt werden können, zählen: die Fähigkeit zur Anpassung des Strombezugs an Strommarktsignale, die Nutzung des lokal erzeugten Stroms, die Netzabhängigkeit sowie die Spitzennetzbelastung. Der erste Aspekt reflektiert die Netzdienlichkeit auf nationaler Ebene, basierend auf den verwendeten Börsenstrompreisen. Die folgenden zwei Aspekte legen den Fokus auf die Gebäudeebene, während die Spitzenlast vor allem die Auswirkungen des Gebäudebetriebs auf das lokale Stromnetz abbildet. Dafür werden entsprechende Indikatoren aus der Literatur

⁴ Die berechneten annualisierten Kosten umfassen alle Ausgaben, die über den betrachteten Zeitraum anfallen, umgerechnet auf ein jährliches Äquivalent. Diese Kostenkalkulation berücksichtigt eine Reihe wichtiger Faktoren: die anfänglichen Investitionen, die Energiekosten unter Berücksichtigung von Preisänderungen und Abzügen für Stromeinspeisungen, die Restwerte der Anlagen am Ende des Betrachtungszeitraums, die jährlichen Servicekosten, wie zum Beispiel Wartungskosten, sowie mögliche Subventionen.

gewählt und implementiert: Flexibilitätsfaktor [114], Eigenverbrauchsquote, Netzunabhängigkeitswahrscheinlichkeit⁵ [115] und Ein-Prozent-Spitzenleistung⁶ [116]. Der Aufbau des MILP-Modells ist in Abbildung 38 dargestellt.

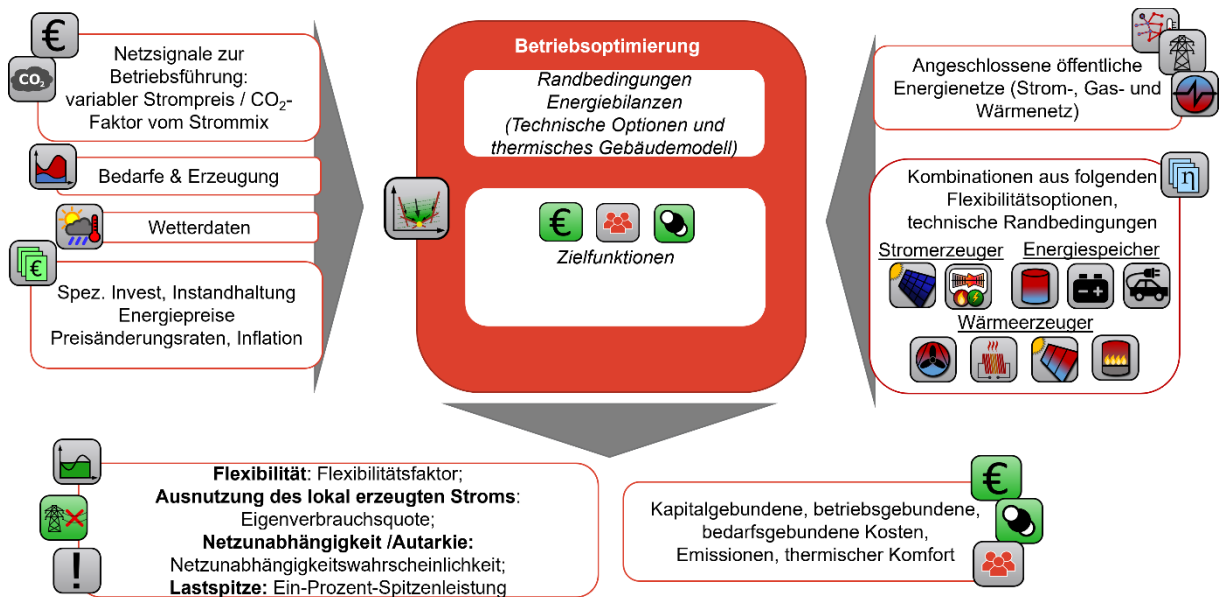


Abbildung 38: Aufbau vom MILP-Modell zur quantitativen Bewertung netzdienlichen Gebäudekonzepte.

Im Rahmen einer Masterarbeit [117] wurden für das erwähnte Einfamilienhaus Betriebsoptimierungsberechnungen bei sechs verschiedenen Kombinationen der Flexibilitätsoptionen durchgeführt. Bei einer Betriebsoptimierung waren die Anlagen und ihre Größe nicht wie bei einer Auslegungsoptimierung variabel, sondern vorgegeben. Zur netzdienlichen Betriebsführung wurden im Zusammenhang mit der Zielfunktion dynamische Strompreise oder dynamische CO₂-Emissionsfaktoren verwendet. Die Ergebnisse der Optimierungsberechnungen zeigen, dass der Einsatz einer Batterie zur Verbesserung der Netzdienlichkeit und zur Reduktion der Emissionen beitragen kann. Gleichzeitig führt die Investition in eine 5-kWh-Batterie zu einer Erhöhung der annualisierten Kosten um ca. 3,7 % im Vergleich zum Gebäudeenergiesystem ohne Batterie. Finanzielle Anreize zur Förderung des Einsatzes dezentraler Batterien konnten basierend auf diesen Ergebnissen empfohlen werden. Im Vergleich zum Gebäudeenergiesystem mit einer Dachbelegung durch eine Photovoltaikanlage schnitt das Gebäudeenergiesystem mit einem kombinierten Einsatz einer Solarthermie- und einer kleineren Photovoltaikanlage flexibler, aber kostenintensiver und emissionsreicher ab. Höhere Kosten für dieses Szenario könnten reduziert werden, wenn überschüssige Wärme der Solarthermieanlage in ein Wärmenetz eingespeist und vergütet würden, was hier noch nicht berücksichtigt wurde.

Neben den Kosten, Emissionen und der Netzdienlichkeit spielt die Nutzerzufriedenheit eine entscheidende Rolle für die Ausbreitung der netzdienlichen Technologien. Vor diesem Hintergrund wurde das bereits aufgebaute Optimierungsmodell um Ansätze zur Untersuchung der Nutzerzufriedenheit weiterentwickelt. Die Nutzerzufriedenheit wurde dabei durch die Beurteilung des thermischen Komforts mittels erwarteter durchschnittlicher Empfindung (Predicted Mean Vote/PMV) und die Begrenzung der Abweichung von den Nutzer:Innen-Anforderungen beim Laden eines Elektroautos berücksichtigt. Für das erwähnte typische Einfamilienhaus wurden diverse Betriebsweisen von einem vollelektrifizierten Gebäudeenergiesystem bestehend aus einer

⁵ Netzunabhängigkeitswahrscheinlichkeit: Anteil der Zeit innerhalb eines festgelegten Zeitraums an, in der weder Strombezug noch Stromeinspeisung vom Gebäudeenergiesystem aus bzw. ins Stromnetz stattfindet.

⁶ Ein-Prozent-Spitzenleistung: durchschnittlicher Leistungswert der höchsten 1 % aller Stromleistungen.

Wärmepumpe, einem Elektroerhitzer, einer Photovoltaikanlage, einer Batterie und einem Warmwasserpeicher untersucht. Dazu wurde ein Elektroauto betrachtet. Hierbei wurden drei Nutzer:Innen-Typen mit unterschiedlichen Priorisierungen zwischen thermischer Behaglichkeit und Stromkosten sowie drei unterschiedliche Nutzer:Innen-Verhalten beim Laden von E-Autos durch Definition der Zielfunktionen und Anpassung der Restriktionen des MILP-Modells abgebildet (vgl. Abbildung 39). Mit den Ergebnissen wurden die resultierenden Jahresstromkosten, der thermische Komfort und die Netzdienlichkeit bewertet. Eine der Kernerkenntnisse aus der Studie ist, dass die untersuchte Betriebsstrategie mit der Minimierung der Stromkosten pro thermischem Komfortniveau vielversprechend für die Anwendung in der Praxis sein kann. Dabei kann sich das Gebäudeenergiesystem mit niedrigen Stromkosten netzdienlich verhalten, wobei der thermische Raumkomfort ebenfalls sichergestellt wird. Zudem stellt sich heraus, dass die Einführung von variablen Strompreisen, welche auf Börsenstrompreisen basieren, keinen ausreichenden monetären Anreiz für das netzreaktive Laden der E-Autos bieten kann. Denn mit der aktuellen Variation der Strompreise ergibt sich aus den Simulationen beim netzreaktiven Laden kein Kostenvorteil gegenüber dem bedarfsgeführten Laden. Das Modell und die Erkenntnisse daraus wurden in einem peer-reviewed Konferenzpapier veröffentlicht [16] und für die Vorstellung auf der BauSIM-Konferenz im September 2022 in Weimar akzeptiert. Die Methodik und die Ergebnisse wurden vor internationalen Forschenden vorgestellt und diskutiert.



Abbildung 39: Übersicht der untersuchten Zielfunktionen und Ladestrategien in der modellbasierten Analyse in [16].

Modellbasierte Entwicklung optimierter netzdienlicher Energiesysteme für typische Wohn- und Nichtwohngebäude in Deutschland

Die erste modellbasierte Analyse spezifischer Gebäudeenergiesysteme zeigt, dass die Performance eines Systems in den Kategorien Wirtschaftlichkeit, Umweltfreundlichkeit und Netzdienlichkeit unter einer bestimmten Betriebsweise keine einheitliche Tendenz aufweist. Um dennoch ökologisch und ökonomisch optimierte sowie netzdienliche Gebäudeenergiesysteme zu entwickeln, wurde das bestehende Optimierungsmodell weiterentwickelt. Dabei wurden zwei zentrale Aspekte der Netzdienlichkeit in der Zielfunktion berücksichtigt: der flexible Strombezug (vgl. Kapitel 3.4.4.1), dargestellt durch die Minimierung der Stromkosten unter dynamischen Preisen, und die Minimierung der Stromeinspeisung ins Netz zur Maximierung des Eigenverbrauchs (vgl. Kapitel 3.4.4.3).

Das weiterentwickelte Modell wurde auf die vier zuvor beschriebenen typischen Gebäudearten in Deutschland zur Auslegungsoptimierung angewendet. Im Einklang mit den Dekarbonisierungszielen wurden nur technische Optionen betrachtet, die erneuerbare Energieträger wie Strom⁷ und Biogas nutzten. Um die ökonomische Sinnhaftigkeit der Systeme sicherzustellen, wurden die annualisierten

⁷ Hierbei wurde angenommen, dass der Anteil erneuerbarer Energien im Strommix weiter ansteigt und der Strom dadurch zunehmend grüner wird.

Kosten auf Basis einer Referenzberechnung begrenzt. Hierbei wurden für jedes Gebäude Auslegungsoptimierungen nach netzdienlichen Zielfunktion bei schrittweisen erhöhten zulässigen annualisierten Kosten durchgeführt. Die daraus resultierenden Entscheidungen hinsichtlich der Anlagenauswahl, Anlagengröße, Energiekosten und Netzdienlichkeitsindikatoren (Flexibilitätsfaktor, Eigenstromverbrauchsquote, Netzunabhängigkeitswahrscheinlichkeit und Ein-Prozent-Spitzenleistung) wurden umfassend analysiert.

Die Erkenntnisse der Analysen dienten als Grundlage, um unter Abwägung ökonomischer und netzdienlicher Aspekte optimierte Energiesysteme für die untersuchten Gebäudetypen abzuleiten. Das zugrunde liegende Optimierungsmodell, die Analyseverfahren und die Ergebnisse wurden in einem 30-seitigen Bericht detailliert dokumentiert und auf der EWB-Website veröffentlicht [17]. Im Folgenden werden die wichtigsten Erkenntnisse zusammengefasst.

In den untersuchten Gebäuden führt die Integration von Netzdienlichkeitsanforderungen in die Zielfunktion zu einer Überdimensionierung der Wärmeerzeugungsleistung im Vergleich zu rein kostenminimierten Systemen, was im Mehrfamilienhaus sogar zu einer Verdopplung der Leistung führt. Dies ermöglicht eine effizientere Nutzung von günstigem Netzstrom und lokal erzeugtem Photovoltaik-Strom. Während in Wohngebäuden nur geringe Anpassungen bei den Wärmeerzeugern notwendig sind, verlagert sich bei den Nichtwohngebäuden die Investition mit steigenden Kosten von Wärmepumpen hin zu Blockheizkraftwerken. Solarthermieanlagen kommen primär in Wohngebäuden zum Einsatz, während in Nichtwohngebäuden strom- und biogasbasierte Hybridsysteme dominieren. Photovoltaikanlagen bedecken in allen Gebäuden den Großteil der Dachfläche, um das lokale Stromerzeugungspotenzial maximal auszunutzen. Dennoch wird in den Wohngebäuden kein autarker Betrieb erreicht, da ein geeignetes Verhältnis von Dachfläche zur Nutzfläche und eine passende Profilgleichzeitigkeit von Stromerzeugung und -bedarf fehlt. Daher werden die Kapazitäten der elektrischen Speicher bei steigenden Kosten erhöht, um Strom aus Photovoltaikanlagen und günstigen Netzstrom zur späteren Nutzung zu speichern. Diese Entwicklung zeigt sich in den steigenden Werten des Flexibilitätsfaktors und der Ein-Prozent-Spitzenleistung. Die daraus resultierenden Lastspitzen könnten jedoch zu Netzengpässen führen, insbesondere wenn alle Gebäude identische Netzsignale nutzen. Große Dachflächen und BHKWs ermöglichten in Nichtwohngebäuden stromnetzunabhängige Systeme, jedoch führt die fehlende Profilgleichzeitigkeit von Stromerzeugung und -bedarf zu Verlusten durch die Abregelung der Photovoltaikanlagen, um die Stromeinspeisung gemäß der Zielfunktion zu minimieren. Es werden in allen vier Gebäuden optimierte netzdienliche Systeme identifiziert, die bei minimalen Kosten zwei der drei Indikatoren – Flexibilitätsfaktor, Eigenstromverbrauchsquote und Netzunabhängigkeitswahrscheinlichkeit – mit Werten über 0,9 erfüllen. Diese Ergebnisse und die kostenminimierten Gebäudeenergiesystem aus den Referenzberechnungen für die Gebäude sind in Tabelle 16 zusammengefasst. Besonders das ermittelte optimierte netzdienliche Gebäudeenergiesystem für das Schulgebäude zeichnet sich durch eine signifikante Steigerung der Netzdienlichkeit bei geringen Mehrinvestitionen aus.

Tabelle 16: Optimierte netzdienliche (Netzdienlich) und kostenminimierte (Referenz) Gebäudeenergiesysteme für vier typische Gebäudearten. BBHKW steht für Biogas-Blockheizkraftwerk, WP für Wärmepumpe, EH für Elektroerhitzer, PV für Photovoltaik, STA für Solarthermieranlagen, TES für thermische Energiespeiche und BAT für Batteriespeicher. „-“ steht dafür, dass diese Anlage nicht in dem Gebäudeenergiesystem betrachtet wurde.

Kapazität		BBHKW in kW _{th}	WP in kW _{th}	EH in kW _{th}	PV in m ²	STA in m ²	TES in kWh _{th}	BAT in kWh _{el}
Einfamilienhaus	Netzdienlich	-	5	2	36	4	9	18
	Referenz	-	5	2	17	2	5	0
Mehrfamilienhaus	Netzdienlich	-	11	11	64	8	30	93
	Referenz	-	6	4	66	6	11	0
Bürogebäude	Netzdienlich	61	22	0	236	0	280	22
	Referenz	0	48	2	232	4	79	0
Schulgebäude	Netzdienlich	124	102	20	1039	0	258	0
	Referenz	21	165	0	1032	6	342	0

Die Ergebnisse aus den modellbasierten Analysen dieses Arbeitspakets wurden, nicht nur, wie oben beschrieben, über unterschiedliche Kanäle veröffentlicht, sondern auch, wie die aus der Grundlagenarbeit, sowohl in internen Treffen mit dem PtJ als auch in Projektetreffen mit den beteiligten Forschungsprojekten ausgetauscht.

Quantitative Bewertung typischer netzdienlicher Gebäudekonzepte in der Forschung

In diesem Arbeitspaket wurden typische netzdienliche Gebäudekonzepte mithilfe der entwickelten Optimierungsmodelle untersucht, um deren Umweltfreundlichkeit, Wirtschaftlichkeit und Netzdienlichkeit zu bewerten. Dabei wurde das Mehrfamilienhaus als typischer Anwendungsfall identifiziert (vgl. 3.4.4.3). Da die Daten zu den in den Forschungsprojekten untersuchten Mehrfamilienhäusern nicht vollständig verfügbar waren, wurde das zuvor beschriebene typische Mehrfamilienhaus (vgl. Tabelle 15) als einheitliche Grundlage für die Vergleichbarkeit herangezogen.

Für den Anwendungsfall Mehrfamilienhaus konnten drei typische Gebäudeenergiesysteme identifiziert werden, die vor allem anhand ihrer Wärmeerzeugungssysteme unterschieden wurden: ein BHKW als alleiniger Wärmeerzeuger (Mono-BHKW), ein Hybridsystem aus BHKW und Wärmepumpe mit Batterie (Hybrid-mit-BAT) sowie ein Hybridsystem aus BHKW und Wärmepumpe ohne Batterie (Hybrid-ohne-BAT). Hierbei zeigt sich, dass ein BHKW in der Forschung häufig als eine Option für netzdienliche Gebäudekonzepte betrachtet wurde. Im Gegensatz dazu wurde bei der Entwicklung eines optimierten netzdienlichen Gebäudekonzepts für das typische Mehrfamilienhaus (vgl. dem Abschnitt oben und Tabelle 16) ein vollelektrifiziertes Energiesystem in Betracht gezogen. Dabei wurde angenommen, dass BHKWs zukünftig vorwiegend Biogas nutzen würden, was hinsichtlich der Dekarbonisierungsziele wünschenswert ist, jedoch aufgrund der begrenzten Verfügbarkeit von Biogas und der unzureichenden Wirtschaftlichkeit und Effizienz kleiner BHKWs für die untersuchten Wohngebäude nicht sinnvoll erscheint. Das optimierte netzdienliche Energiesystem (Vollelektrifizierung) für das Mehrfamilienhaus

wurde als Referenz verwendet. Weitere Informationen zu der Analyse sind im ausführlichen Bericht [17] enthalten.

Da die Angaben zu den Anlagen der Energiesysteme aus den Forschungsprojekten unvollständig waren, wurden für das typische Mehrfamilienhaus drei Auslegungsoptimierungen durchgeführt, um die optimale Dimensionierung der Flexibilitäts- und Speicheroptionen der drei Gebäudeenergiesysteme zu ermitteln. Diese Auslegungsoptimierungen erfolgten unter identischen Randbedingungen und mit derselben Zielfunktion zur Minimierung der annualisierten Kosten, um eine einheitliche Grundlage für die Vergleichbarkeit zu schaffen. Tabelle 17 zeigt die Anlagen der drei bewerteten typischen Gebäudeenergiesysteme zusammen mit deren Dimensionierung. Zudem werden die Anlagen des optimierten netzdienlichen Gebäudeenergiesystems als Referenz aufgeführt. Die resultierenden annualisierten Kosten und jährlichen Betriebsemissionen sind in Abbildung 40 dargestellt. Die Berechnung der Betriebsemissionen basierte auf den Emissionsfaktoren des Strommixes und Biogases für das Jahr 2035 anhand der Angaben in [118]. Daraus lässt sich schließen, dass hybride oder vollelektrifizierte Gebäudeenergiesysteme emissionsärmer sind als das System mit BHKW als alleinigem Wärmeerzeuger. Die Emissionsreduktion durch die Einführung von strombasierten Wärmeerzeugern im Vergleich zu rein brennstoffbasierten Systemen könnte zwischen 40 und 75 % liegen. Die Kostendifferenz zwischen den netzdienlichen Gebäudekonzepten in der Forschung ist gering. Diese Gebäudeenergiesysteme schneiden im Vergleich zum vollelektrifizierten System wirtschaftlicher ab, mit einer durchschnittlichen Kostenreduktion von ca. 33 %. Die hohen Kosten des Referenzsystems hängen mit der Investition in eine große Batterie zusammen (vgl. Tabelle 17).

Tabelle 17: Typische netzdienliche Gebäudeenergiesysteme aus der Forschung. Die Anlagegrößen resultieren aus der Auslegungsoptimierung an einem vordefinierten typischen Mehrfamilienhaus. BBHKW steht für Biogas-Blockheizkraftwerk, WP für Wärmepumpe, EH für Elektroerhitzer, PV für Photovoltaik, STA für Solarthermieanlagen, TES für thermische Energiespeicher und BAT für Batteriespeicher. „-“ steht dafür, dass diese Anlage nicht in dem Gebäudeenergiesystem betrachtet wurde.

Kapazität	BBHKW in kW_{th}	WP in kW_{th}	EH in kW_{th}	PV in m^2	STA in m^2	TES in kWh_{th}	BAT in kWh_{el}
Mono-BHKW	10	-	-	56	-	23	4
Hybrid-mit-BAT	10	5	-	65	-	21	4
Hybrid-ohne-BAT	10	5	-	66	-	6	-
Vollelek. (Referenz)	-	11	11	64	8	30	93

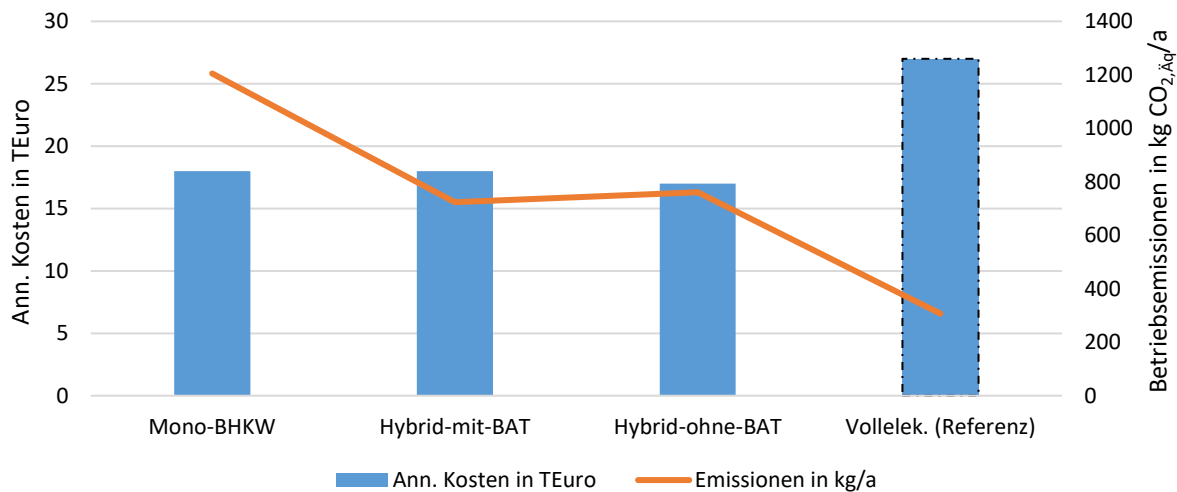


Abbildung 40: Annualisierte (Ann.) Kosten und jährliche Betriebsemissionen von typischen netzdienlichen Gebäudeenergiesystemen in der Forschung für eine Anwendung in einem Mehrfamilienhaus.

Der betrachtete typische netzdienliche Betrieb basierte auf einem strompreisgeführten Strombezug mit gleichzeitiger Maximierung der Eigenstromverbrauchsquote. Dies wurde mithilfe einer Betriebsoptimierung der drei Gebäudeenergiesysteme, basierend auf der gleichen Zielfunktion wie bei der Entwicklung optimierter netzdienlicher Energiesysteme für typische Wohn- und Nichtwohngebäude in Deutschland, abgebildet. Aus den Ergebnissen der Betriebsoptimierung wurden die Indikatoren der Netzdienlichkeit berechnet. Sie sind in Abbildung 41 dargestellt. Alle Indikatoren haben einen Wertebereich von 0 bis 1. Dabei wurden zur Normalisierung der ermittelten Ein-Prozent-Spitzenleistungen auf einen Bereich von 0 bis 1 die maximalen Ein-Prozent-Spitzenleistungen aus allen vier Gebäudeenergiesystemen als Referenz herangezogen. Je größer der Flexibilitätsfaktor, die Eigenstromverbrauchsquote, die Netzunabhängigkeit und die relativen Ein-Prozent-Spitzenleistungen sind, desto flexibler ist der Strombezug anhand dynamischer Strompreise, desto mehr lokal erzeugter Strom wird direkt vor Ort verbraucht, desto mehr Zeit wird ohne Stromaustausch mit dem Stromnetz verbracht und desto höher sind die Strombezugs- bzw. Stromeinspeisungsleistungen.

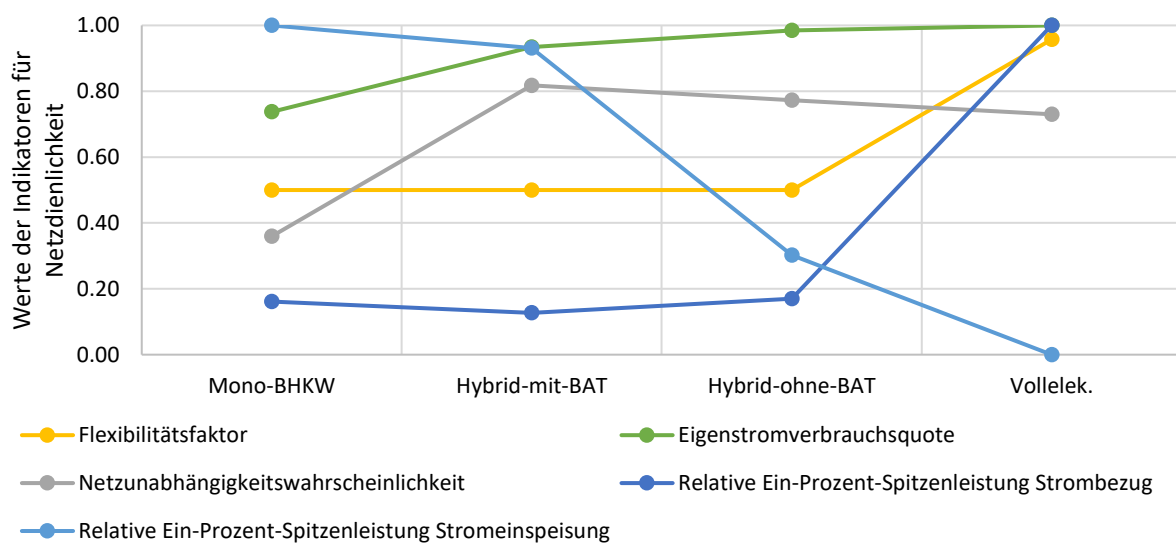


Abbildung 41: Werte der Netzdienlichkeitsindikatoren für die typischen netzdienlichen Gebäudekonzepte aus der Forschung

Aus den Werten der Netzdienstleistungsindikatoren lässt sich schließen, dass die Hybrid-Systeme im Vergleich zum Mono-BHKW-System in allen Teilaspekten der Netzdienstlichkeit überlegen sind. Der Vergleich der beiden Hybrid-Systeme zeigt, dass das Vorhandensein einer kleinen Batterie keinen großen Einfluss auf die Netzdienstlichkeit hat, außer bei der Spitzenleistung für die Stromspeicherung. Beim Vergleich der netzdienstlichen Konzepte aus der Forschung mit dem Referenzsystem fällt auf, dass das voll-elektrifizierte System flexibler ist, den lokal erzeugten Strom vollständig verbraucht, keinen Strom ins Netz einspeist, jedoch höhere Lastspitzen beim Strombezug aufweist und weniger netzunabhängig ist als das Hybrid-System mit Batterie.

3.4.5 AP 4.5: Modernisierungsfahrpläne und Szenarienbetrachtung des Energiebedarfs des deutschen Gebäudebestandes

Arbeitspaket 4.5 beinhaltet die Integration der Erkenntnisse aus den vorherigen APs, indem Szenarien für die Entwicklung des deutschen Gebäudebestandes erstellt und analysiert wurden. Die Integration der Erkenntnisse aus den vorangegangenen APs erfolgte in Abstimmung mit allen Modulpartnern (Fraunhofer ISI, RWTH EBC und Fraunhofer IBP). Es wurde ein mikro- und ein mesoanalytischer Ansatz verfolgt. Zum einen wurden durch RWTH EBC auf Gebäudeebene Modernisierungsfahrpläne (Gebäudehülle und Anlagentechnik) für verschiedene Gebäudetypen unter unterschiedlichen Randbedingungen entwickelt und bewertet (Mikroebene). Zum anderen wurde durch Fraunhofer ISI auf Mesoebene eine Szenarienbetrachtung des deutschen Gebäudebestandes mittels eines detaillierten Energienachfragemodells durchgeführt.

Ziele des Arbeitspakets

- Generierung von Modernisierungsfahrplänen und Bestimmung optimierter Umsetzungszeitpunkte der Sanierungs- und Modernisierungsmaßnahmen für Typgebäude sowie Gebäudeportfolios (Mikroanalyse)
- Skalierung der in AP 4.1 ermittelten Potentiale der Einspareffekte an Energie und klimaschädlicher Emissionen
- Bottom-up Modellierung und Darstellung der Einspareffekte an Energie und klimaschädlicher Emissionen für den deutschen Gebäudebestand in Szenarien (Mesoanalyse), basierend auf den Quantifizierungen der vorangegangenen AP, bspw. in Bezug verschiedener Sanierungsbreiten und -tiefen

Methoden

- Optimierungsmodell zur Auswahl geeigneter Modernisierungspfade aus den in AP 4.1 ermittelten Pfaden auf Gebäudeebene
- Szenarienmodellierung
- Agentenbasiertes Gebäudebestandsmodell
- Eingabedatenaufbereitung für das agentenbasierte Gebäudebestandsmodell unter Einbeziehung der ausgetauschten Informationen aus früheren APs

Ergebnisse:

- Ergebnisse des Optimierungsmodells zur Ermittlung von Modernisierungsfahrplänen:
 - Bereits moderate Mehrkosten im Vergleich zum ökonomischen Optimum ermöglichen signifikante Emissionseinsparungen (z. B. 50 % Reduktion bei 15 % Mehrkosten).
 - Einfamilienhäuser und Nichtwohngebäude werden bei ökonomischer Optimierung bevorzugt modernisiert.
 - Ambitionierte Emissionsziele erfordern höhere Investitionen und priorisieren Maßnahmen mit großer Hebelwirkung, z. B. an Mehrfamilienhäusern.
- Ergebnisse der Szenarienmodellierung
 - Bis 2050 ist eine Reduzierung des Endenergiebedarfs um 30 bis 35 % im Vergleich zu 2020 möglich.
 - Der Raumwärmebedarf kann bis 2050 um 35-45 % im Vergleich zu 2020 gesenkt werden.
 - Eine Erhöhung der Sanierungsrate von 1,2 % auf mindestens 1,8 % ist notwendig, um die Transformation des Gebäudebestands zu erreichen.
 - Zuschüsse von bis zu 75 % auf die Kosten der Sanierung der Gebäudehülle verhelfen dem Szenario der nachhaltigen Transformation zum niedrigsten Energiebedarf unter den Szenarien.
 - Die Zunahme der Elektrifizierung ist in allen Szenarien offensichtlich (40-52 % bis 2050).
 - Die Elektrifizierung der Wärmebereitstellung durch Wärmepumpen wird bis 2050 voraussichtlich zwischen 35 und 55 % der gesamten Wärmebedarf ausmachen.
 - Förderungen von bis zu 60 % auf die Investitionskosten von Modernisierungen für erneuerbare Heizungsanlagen führen dazu, dass das Szenario der nachhaltigen Transformation die niedrigsten Emissionen unter den Szenarien aufweist.
 - Eine vollständige Dekarbonisierung des Energiebedarfs wird in keinem Szenario bis 2045 oder 2050 erreicht. Darüber hinaus liegen die gesamten direkten Emissionen im Jahr 2030 im Rahmen des STS immer noch 15 Mio. t CO₂-Äquivalente über dem sektoralen Ziel, das sich das Bundes-Klimaschutzgesetz gesetzt hat. Im begrenztesten Szenario (LTS) wird der Gebäudesektor im Jahr 2050 immer noch 55 Mio. t CO₂-Äquivalente ausstoßen.
 - Die Austauschrate von Bestandsheizsystemen wurde als wichtigstes Hindernis für das Erreichen des Dekarbonisierungsziels im Gebäudesektor identifiziert. Wenn die Szenarien allein auf das technische Ende der Lebensdauer setzen, um fossile Heizungen zu ersetzen, reicht der Zeitraum bis 2045 oder 2050 nicht aus, um alle fossilen Heizsysteme auf erneuerbare Heizsysteme umzustellen.

Zur Erstellung von Modernisierungsfahrplänen auf nationaler Gebäudebestandsebene wurde das in AP 4.1 entwickelte Optimierungsmodell weiterentwickelt. Ziel des Modells ist die Erstellung von Modernisierungsfahrplänen zur Minimierung von kumulierten Emissionen und Gesamtkosten für einen Zeitraum von bis zu 30 Jahren für typische Gebäude des deutschen Bestands. Hierbei trifft das Optimierungsmodell für jedes Jahr des betrachteten Zeithorizonts Entscheidungen über die Dämmung oder/und den Anlagentausch innerhalb der Gebäude des Portfolios, wodurch Fahrpläne entstehen. Zur Reduktion der Komplexität des großen Optimierungsproblems wurde methodisch ein zweistufiger Ansatz gewählt. In einem ersten Schritt werden für verschiedene Gebäudearchetypen kosten-emissions-optimale Modernisierungsfahrpläne ermittelt (vgl. AP 4.1). In der zweiten Stufe des Modells werden durch ein ganzzahliges Optimierungsmodell unter beschränkten Handwerkskapazitäten kosten-optimale Modernisierungsfahrpläne zur Erreichung von Emissionszielen auf Gebäudebestandsebene erstellt. Abbildung 42 veranschaulicht den zweistufigen Ansatz zur Erstellung von Modernisierungsfahrplänen auf Portfolioebene.

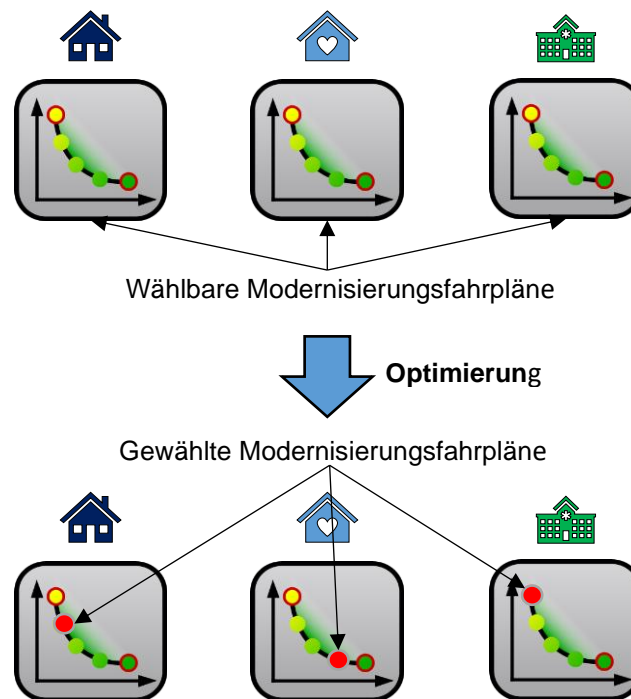


Abbildung 42: Zweistufiger Ansatz zur Erstellung von Modernisierungsfahrplänen auf Portfolioebene.

Auf Basis des Optimierungsmodells können kosten-emissions-optimale Modernisierungsfahrpläne auf Portfolioebene gefolgert werden. Abbildung 43 zeigt die Ergebnisse der Optimierung unter unbegrenzter Verfügbarkeit von Handwerkern sowie einem unbegrenzten Investitionsbudget. Als Referenz werden die Kosten und Emissionen des unsanierten Bestandsgebäudes im Diagramm mit angegeben. In der Nähe des ökonomischen Optimums ergibt sich eine steile Pareto-Front. Dies zeigt, dass bereits mit geringen Mehrkosten signifikante Emissionseinsparungen erreicht werden können. Beispielsweise zeigt Pareto-Punkt par. 4 im Vergleich zum ökonomischen Optimum 50 % Emissionseinsparungen bei 15 % Mehrkosten. Ab Pareto-Punkt par. 5 sind die Mehrkosten überproportional groß und erreichen nur geringe Emissionseinsparungen.

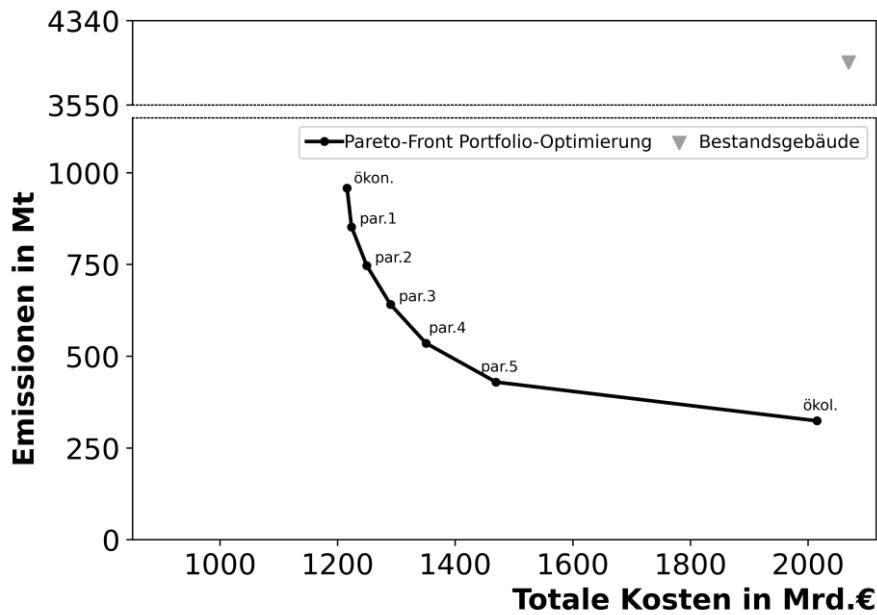


Abbildung 43: Paretofront der Optimierung des deutschen Gebäudebestands mit unbegrenzter Verfügbarkeit von Handwerkern und Investitionsbudgets.

Abbildung 44 stellt dar, wie sich die kumulierten Emissionen in den verschiedenen pareto-optimalen Lösungen auf verschiedene Gebäudetypen, Baualtersklassen und Klimaregionen aufteilen. Der Vergleich von Pareto-Punkt 1 mit dem ökonomischen Optimum zeigt bezüglich der Verteilung der Emissionen auf Gebäudetypen einen steigenden Anteil der Emissionen von Mehrfamilienhäusern. Dies zeigt eine Priorisierung der Modernisierung von Einfamilienhäusern und Nichtwohngebäuden gegenüber Mehrfamilienhäusern. Der Anteil der Emissionen von Nichtwohngebäuden steigt ab Pareto-Punkt 3, was eine Priorisierung der Maßnahmen an Wohngebäuden anzeigt. Maßnahmen an Mehrfamilienhäusern zeigen sich im Optimierungsmodell als wenig wirtschaftlich, haben allerdings einen großen Hebel auf die Emissionseinsparung. In Fahrplänen mit ambitionierten Emissionszielen ergibt sich eine weitreichende Modernisierung von Mehrfamilienhäusern.

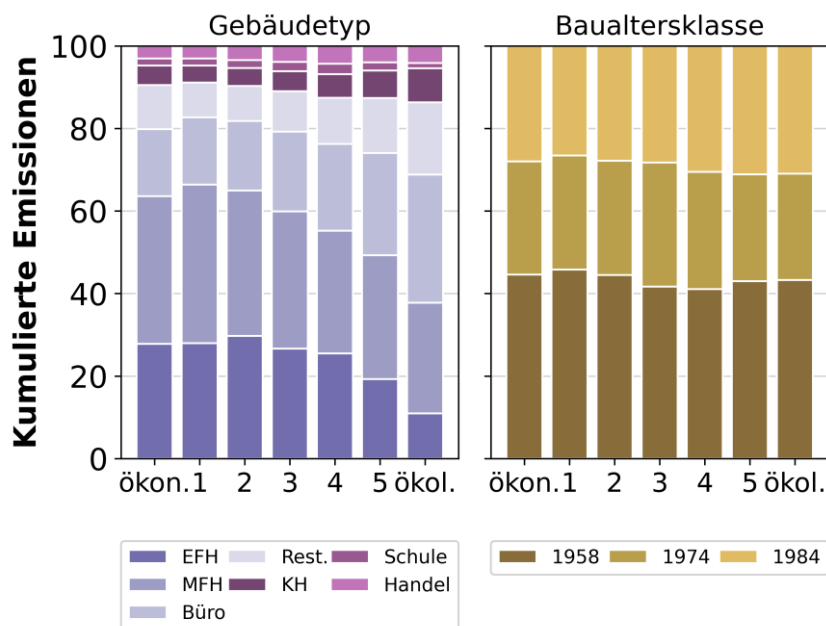


Abbildung 44: Analyse der Priorisierung von Baualtersklassen innerhalb der Portfoliooptimierung. Erläuterung der Abkürzungen: EFH-Einfamilienhaus, Rest.-Restaurant, MFH-Mehrfamilienhaus, KH-Krankenhaus.

Im Bereich der Szenarienbetrachtung des Energiebedarfs des deutschen Gebäudebestands wurde die Szenarienmodellierung verwendet, die häufig als Methode zur Quantifizierung der zukünftigen Entwicklung des Energieverbrauchs und der Treibhausgasemissionen eingesetzt wird. Die Szenarienbetrachtung im AP 4.5 besteht aus zwei Bausteinen, die durch einen iterativen Austausch aufeinander aufbauen: der partizipativen Szenarientwicklung sowie der Modellierung und Szenarienberechnung. Die Integration der qualitativen Szenarientwicklung mit der quantitativen Modellierung ermöglicht die Analyse der zukünftigen Entwicklung des deutschen Gebäudesektors unter Berücksichtigung der aktuellen gesellschaftlichen, technischen, ökologischen, wirtschaftlichen und politischen Rahmenbedingungen. Die qualitative Szenarientwicklung bietet einen reichhaltigen narrativen Kontext und liefert Einblicke in verschiedene Faktoren, die die Ergebnisse beeinflussen können, während die quantitative Modellierung Präzision und numerische Daten bereitstellt, was ein konkreteres Verständnis der potenziellen Szenarien ermöglicht. In der Folge werden diese Bausteine sowie die Visualisierung der Szenarienergebnisse ausführlich erläutert.

3.4.5.1 Szenarientwicklung

Die Szenarien für die Entwicklung des deutschen Gebäudebestands wurden in einem partizipativen und Workshop-basierten Prozess entwickelt. Diese Workshops wurden auf drei Ebenen durchgeführt: Projektkernteam (Fraunhofer ISI), Projektkonsortium (BF-Modul II-Team) und externen Expert:Innen (Workshop auf einem Projektetreffen). Die Szenarientwicklung erfolgte in vier Schritten, wie in Abbildung 45 dargestellt.

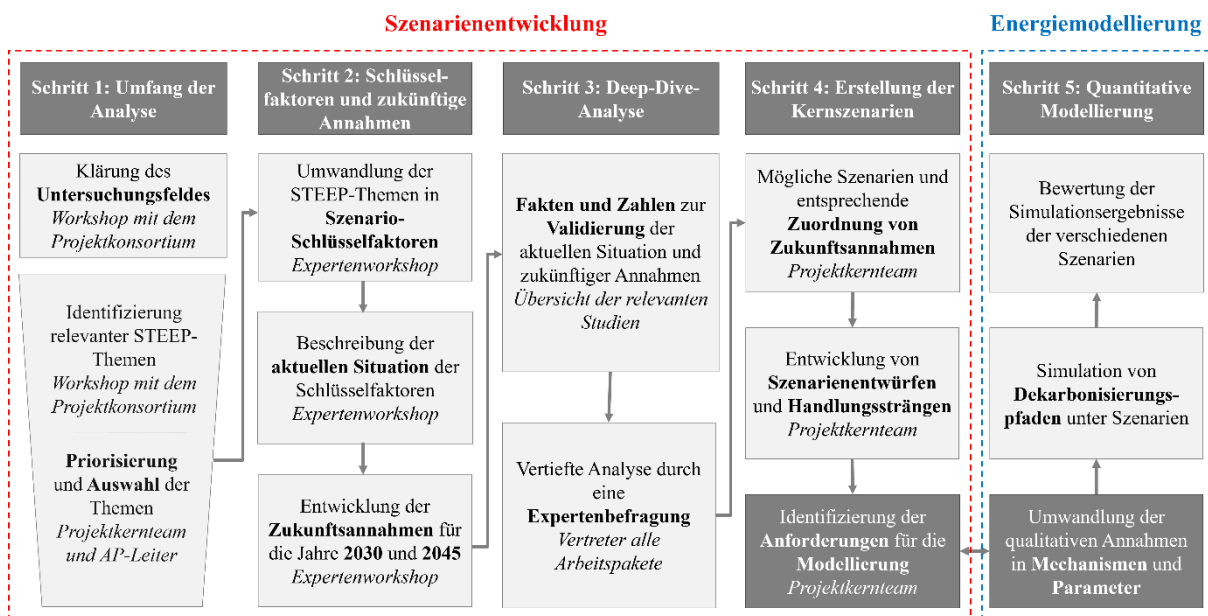


Abbildung 45: Schema des Ansatzes für die Szenarienmodellierung in AP 4.5.

Schritt 1: Definition des Analyseumfangs und Identifizierung der Schlüsselfaktoren

Der Fokus lag hier darauf, das Untersuchungsfeld zu klären und relevante Faktoren zu identifizieren. Im Rahmen zweier Workshops mit dem Projektkonsortium wurden zukünftige Entwicklungen von technischen, ökologischen, ökonomischen, politischen, aber auch gesellschaftlichen Faktoren diskutiert, die das Energiesystem von Gebäuden beeinflussen. Im ersten Workshop wurde im ersten Schritt das Thema inhaltlich (bezogen auf Gebäudetypen - Wohngebäude (WG) und Nichtwohngebäude (NWG) nach dem Bundes-Klimaschutzgesetz), räumlich (bezogen auf den geografischen Bereich – deutschlandweit mit Spezifikationen für die einzelnen Bundesländer) sowie zeitlich (bis zum Jahr 2045 – Jahr 2030 als Zwischenziel) abgegrenzt. Im nächsten Schritt wurden nach dem STEEP-Ansatz (Social, Technological, Ecological, Economical and Political) [119] Einflussbereiche auf den klimaneutralen

Gebäudebestand identifiziert und konkretisiert. Hierfür wurden wesentliche Aspekte, die für das Thema "Gebäudebestand" heute und in der Zukunft relevant sind, genannt und diskutiert. Die exemplarischen Ergebnisse dieses Schrittes sind in Tabelle 18 dargestellt.

Tabelle 18: Ergebnisse der STEEP-Analyse

STEER-Kategorie	Ausgewählte relevante Aspekte
Gesellschaft	Lebensqualität / Komfort der Gebäudenutzer:Innen Lebensstil / Haushaltsstruktur und -größe / Wohnkonzepte Umweltkompetenz Engpass in Handwerksbetrieben / Handwerkskapazitäten Demografischer Wandel
Technologie	Gebäudeleitsysteme Sanierungs- / Modernisierungslösungen Lösungen für Neubauten Netzeffizienz / nachfrageseitiges Management Optimaler vs. suboptimaler Gebäudebetrieb Komplexität neuer energieeffizienter Lösungen / Beratungskompetenz
Ökologie	Extreme Wetterbedingungen Verfügbarkeit von Ressourcen Grüne Gase / Brennstoffe / Biomasse und deren Verfügbarkeit im Gebäudesektor
Wirtschaft	Preis technologischer Lösungen Eigentümerstruktur Budget, das in Haushalten verfügbar ist Finanzierung / Investitionen Globale Lieferketten / Störungen Private Haushalte als Akteure im Flexibilitätsmarkt / neue Geschäftsmodelle / Öffnung des Strommarktes
Politik und Regulierung	Förderung von Innovationen / Rahmenbedingungen für Innovationen Subventionen für Anlagen- und Bautechnologie Gesetzliche Anforderungen, z. B. "verpflichtende Sanierung" Globaler Machtwechsel / politische Entwicklung

Schritt 2: Identifikation der Schlüsselfaktoren und Entwicklung zukünftiger Annahmen

Die STEEP-Aspekte wurden in einem Expertenworkshop im Rahmen eines Projektetreffens in Schlüsselfaktoren für die Szenarientwicklung umgewandelt. Dabei wurde der neue Faktor in einigen Fällen greifbarer und leichter verständlich, während er in anderen Fällen zu einem umfassenderen Begriff führte. Ziel der Transformation und Definition der Schlüsselfaktoren war es, beide Ergebnisse zu erzielen, abhängig vom spezifischen STEEP-Aspekt. Ein Beispiel für diese Transformation ist der Aspekt „Globale Lieferketten / Störungen“ aus der STEEP-Kategorie Wirtschaft, der zum Szenarienschlüsselfaktor „Entwicklung von Lieferketten“ wurde. Die ursprünglichen STEEP-Kategorien wurden aufgelöst, und die 16 identifizierten Schlüsselfaktoren wurden in fünf Kategorien zusammengefasst (siehe Tabelle 19). Im Workshop wurden zudem ein gemeinsames Verständnis für die Ist-Situation in Bezug auf die Faktoren geschaffen und Annahmen über die zukünftige Entwicklung dieser Faktoren für die Jahre 2030 und 2045 entwickelt. Dies bildete die Grundlage für die Szenarien, die in den folgenden Schritten finalisiert wurden.

Tabelle 19: Schlüsselfaktoren - Klimaneutraler Gebäudebestand 2045

Kategorie	Faktor
Kategorie 1: Energetische Gebäudesanierung als Kernbaustein der Energiewende	Serielle Sanierung
	Niedrigere Vorlauf- und Fernwärmemetemperatur
	Sanierungsfahrpläne
	Wahl des optimalen Energiesystems
Kategorie 2: Integration des Einzelgebäudes in das Gesamtsystem	Flexibilitätpotenziale an der Endverbraucherseite (Gebäude)
	Digitalisierungsfortschritte im Gebäudesektor
Kategorie 3: Neubau als Innovationstreiber	Effizienzsteigerung durch Forschungsarbeit/Technologiefortschritt
	Pflicht eines klimaneutralen Gebäudebetriebs bei Neubauten
	Solarpflicht (PV) bei Neubauten
Kategorie 4: Regulatorische Rahmenbedingungen	Förderprogramme
	Regulatorischen Einschränkungen für den Neu- und Umbau
	Sanierungszwänge
Kategorie 5: Gesellschaft und Wirtschaft	Handwerkskapazitäten / Wirtschaftlichkeit der Betriebe
	Entwicklung von Lieferketten
	Einkommensentwicklung
	Haushaltsstruktur und Größe

Schritt 3: Deep-Dive-Analyse der zukünftigen Annahmen

In diesem Schritt wurden die im Expertenworkshop entwickelten zukünftigen Annahmen validiert und die Schlüsselfaktoren finalisiert. Durch die Literaturrecherche sowie vertiefende Abfragen innerhalb der AP 4.1, AP 4.2, AP 4.4 und AP 5 wurden die Faktoren und die dazugehörigen Zukunftsannahmen festgelegt und kurz beschrieben. Die Abfrage beinhaltete folgende Punkte:

- Identifizierung der für das Thema relevanten thematischen Bereiche sowie konkreten Faktoren:
 - Die bisherigen Vorschläge wurden aufgelistet und konnten durch die Teilnehmenden spezifiziert werden.
 - Es konnten weitere Faktoren vorschlagen werden bzw. bestehende zusammengefasst werden.
- Beschreibung der Ist-Situation in Bezug auf den jeweiligen Faktor für das Jahr 2022
- Beschreibung von Zukunftsannahmen in Bezug auf die zukünftige Entwicklung der Faktoren für die Zeitpunkte 2030 und 2045 mit folgenden Fragestellungen:
 - Gibt es nur einen möglichen Entwicklungszustand, der für einen Zeitpunkt denkbar ist (Annahme A)?
 - Gibt es aufgrund von Unsicherheiten in diesem Bereich weitere Möglichkeiten? (Annahme B, Annahme C, etc.)?

Schritt 4: Analyse der Kompatibilität der zukünftigen Annahmen zueinander und Aufbau der Kernszenarien

In diesem Schritt wurden die zukünftigen Annahmen für verschiedene Zeitrahmen beschrieben und in drei Szenarien gebündelt. Zur Finalisierung der Beschreibungen der Zukunftsannahmen einzelner Faktoren fanden zwei AP-interne Workshops (Projektkernteam) statt. Tabelle 20 stellt ein Beispiel für die Formulierung der Annahmen in den verschiedenen Zeitrahmen. Auf dieser Grundlage wurden anschließend die Szenariomöglichkeiten diskutiert, die sich aus der Zusammenstellung von Annahmen unterschiedlicher Faktoren ergeben haben. Die Zukunftsannahmen der einzelnen Faktoren wurden somit zu drei plausiblen Szenarien, nämlich Szenarien A, B und C zusammengefasst.

Tabelle 20: Beispiel für einen Schlüsselfaktor mit seiner Ist-Situation und den zukünftigen Annahmen

Kategorie 2: Entwicklung von Lieferketten		
2022	2030	2045
<p>Ist-Situation</p> <p>Die größten Herausforderungen, vor denen die Bauindustrie steht, sind Verzögerungen und Probleme in der Lieferkette sowie die Verfügbarkeit von Rohstoffen. Es gibt einen zunehmenden Mangel an Materialien in der Bauindustrie. Darüber hinaus bedeuten die steigende Globalisierung und das globale Verbraucherverhalten, dass Lieferketten lang und komplex werden können.</p> <p>Das Lieferkettenmanagement steht jedoch vor einem grundlegenden Paradigmenwechsel. Die Lieferkette ist so eng mit dem Produktionssystem eines Unternehmens sowie dem gesamten Geschäftsmodell verknüpft, dass sie nicht mehr separat betrachtet werden kann. Sie wird zunehmend zu einer Erweiterung des eigenen Unternehmens. Generell klagt die gesamte Bauindustrie über einen Mangel an Materialien.</p> <p>Der Großteil des in Deutschland verwendeten Stahls stammt aus Russland oder der Ukraine, und diese Lieferanten sind nun weitgehend abwesend. Auch ein Mangel an Asphalt, Beton und Öl ist zu verzeichnen. Es besteht die Gefahr eines Mangels an Baumaterialien, wo immer Russland, die Ukraine und Weißrussland in der Prozesskette beteiligt sind.</p>	<p>Annahme A</p> <p>Aufgrund der Lessons Learned aus der Corona-Zeit, haben die Unternehmen die Lieferrisiken proaktiv und effektiv gemanagt. Sie setzen auf eine verstärkte Lagerhaltung, den Aufbau alternativer Lieferanten und Lieferwege sowie einen stärkeren regionalen Einkauf, um die Versorgungssicherheit zu erhöhen und zukünftige Krisen besser zu bewältigen.</p>	<p>Annahme A</p> <p>Die Lieferketten sind stabiler geworden, da der Fokus gänzlich auf die regionale bzw. nationale Versorgung verlagert wurde.</p> <p>Die Probleme konnten gelöst werden, nicht im Abschaffen von Just-in-Time, sondern im selektiven Absichern gegen konkret erkannte Ausfallrisiken.</p>
	<p>Annahme B</p> <p>Aufgrund der Lessons Learned aus der Corona-Zeit, haben die Unternehmen die Lieferrisiken verbessert, jedoch ist die Planung bisher nur regional oder örtlich teilweise erfolgt.</p> <p>Es gibt Fortschritte, aber die Maßnahmen sind noch nicht umfassend umgesetzt, was zu einer gewissen Unsicherheit in der Lieferkette führen kann.</p>	<p>Annahme B</p> <p>Aufgrund der Lessons Learned aus der Corona-Zeit, haben die Unternehmen die Lieferrisiken viel besser und effektiver gemanagt, z. B. durch mehr Lagerhaltung, den Aufbau alternativer Lieferanten und Lieferwege, oder auch mit stärker regionalem Einkauf. Die Probleme konnten gelöst werden nicht im Abschaffen von Just-in-Time, sondern im selektiven Absichern gegen konkret erkannte Ausfallrisiken.</p>
	<p>Annahme C</p> <p>Es kommt zu Unterbrechungen bzw. Beeinträchtigungen der globalen Lieferketten aufgrund verschiedener Risiken. Dazu gehören u.a. Naturkatastrophen, die die Produktion in der heimischen Wirtschaft stark zum Erliegen bringen können oder Katastrophen in einem Drittland, die die internationale Versorgung mit Betriebsmitteln beeinträchtigen. Es gibt auch vorsätzliche Unterbrechungen, wie terroristische Anschläge, Sabotage oder Aktionen von Aktivist:Innen.</p>	<p>Annahme C</p> <p>Aufgrund der Lessons Learned aus der Corona-Zeit, haben die Unternehmen die Lieferrisiken verbessert, jedoch ist die Planung bisher nur regional oder örtlich teilweise erfolgt. Es gibt Fortschritte, aber die Maßnahmen sind noch nicht umfassend umgesetzt, was zu einer gewissen Unsicherheit in der Lieferkette führen kann.</p>

Die drei Richtungen der Szenarien – positiv, pessimistisch und ein Mittelweg – resultierten aus der Umfrage zu den zukünftigen Annahmen und internen Workshops. Die gestalteten Szenarien decken ein breiteres Spektrum von optimistischen bis pessimistischen Zukunftszuständen ab, um eine breitere Palette von Entwicklungen zu berücksichtigen.

Die Szenarien, die auf den Annahmen A und C basieren, stellen zwei eher extreme Entwicklungsoptionen für das Jahr 2030 dar, während Szenario B eine hybride Variante zwischen den beiden Extrem-Szenarien A und C repräsentiert.

Szenario A: Nachhaltige Transformation des Gebäudesektors

(Sustainable transformation scenario: STS)

Dieses Szenario beschreibt eine optimistische Vision für den deutschen Gebäudesektor im Jahr 2030, in der umfassende Maßnahmen ergriffen wurden, um den Gebäudebestand nachhaltiger zu gestalten. Dies betrifft sowohl technologische Implementierungen und Regulierungen als auch wirtschaftliche und soziale Aspekte. In diesem Szenario wird das Potenzial zur Effizienzsteigerung von Gebäuden voll ausgeschöpft und diese positive Entwicklung setzt sich bis 2045 fort.

Szenario B: Herausforderungen der Transformation und unterschiedliche Fortschritte im Gebäudesektor

(Challenged transformation scenario: CTS)

Szenario B ist geprägt von partiellen Herausforderungen und begrenzten Fortschritten. Dieses Szenario ist eine hybride Variante zwischen den beiden Extrem-Szenarien und geht in den meisten Szenarienaspekten des Szenarios von einem mittleren Entwicklungspfad aus. Aufgrund der Herausforderungen bei technologischen oder regulatorischen Implementierungen wird das Potenzial zur Effizienzsteigerung von Gebäuden in diesem Szenario nur teilweise ausgeschöpft.

Szenario C: Fachkräftemangel und Unsicherheiten in der Entwicklung des Gebäudebestands

(Limited transformation scenario LTS)

Dieses Szenario, das eine Fortführung des Status Quo darstellt, skizziert eine pessimistische Vision für den deutschen Gebäudebestand mit nur begrenzter oder keiner Verbesserung der Gebäudeeffizienz bis 2030. Dieses Szenario berücksichtigt die Schwierigkeiten aufgrund des Fachkräftemangels und der Unterbrechungen in der globalen Lieferkette. Hinzu kommt, dass die technologischen Potenziale aufgrund der geringen Investitionsbereitschaft in der Branche ungenutzt bleiben

Für das Jahr 2045 zeigen alle Faktoren und Annahmen (in allen Szenarien) einen Entwicklungsschub in Richtung steigender Gebäudeeffizienz, sodass die extreme negative Variante hinsichtlich der Effizienz (Szenario C von 2030) nicht mehr gerechtfertigt ist.

Der Prozess und die Ergebnisse der partizipativen Szenarientwicklung wurden 2024 auf der eceee-Konferenz⁸ präsentiert und als Proceedings dieser Konferenz veröffentlicht. Tabelle 21 bietet eine Zusammenfassung der Szenarien. Eine detaillierte Erläuterung der Szenarien ist in [120] verfügbar. Im Anschluss an die qualitative Szenarientwicklung wurden die Dekarbonisierungspfade des deutschen Gebäudebestands unter verschiedenen Szenarien mithilfe eines Gebäudemodells quantifiziert. Die qualitativ beschriebenen Szenarien repräsentieren unterschiedliche Rahmenbedingungen für die anschließende Modellierung. Zunächst wurden die einzelnen Zukunftsannahmen in Modellparameter übertragen. Ein iterativer Prozess stellte sicher, dass die Modellierung die getroffenen Annahmen adäquat abbilden kann. Gegebenenfalls wurden diese Annahmen angepasst, um sie in das Modell zu integrieren.

⁸ <https://www.eceee.org/summerstudy/>

Tabelle 21: Beschreibung der Szenarien nach den thematischen Kategorien

	<u>STS</u>	<u>CTS</u>	<u>LTS</u>
	Nachhaltige Transformation im Gebäudesektor	Herausforderungen im Übergang und unterschiedliche Fortschritte	Fachkräftemangel und Unsicherheiten in der Entwicklung des Gebäudebestands
<p>Kategorie 1</p> <p>Energetische Gebäudesanierung als Kernbaustein der Energiewende</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Die serielle Renovierung wird ab 2030 weitgehend übernommen. • Niedertemperatur-Fernwärme ist weit verbreitet. • Die Digitalisierung der Sanierungsfahrpläne für das gesamte Gebäude ist gelungen. • Die Gebäude fungieren als Prosumenten. 	<ul style="list-style-type: none"> • Die serielle Sanierung wird ab 2045 weitgehend übernommen. • Teilweise wird Niedertemperatur-Fernwärme genutzt. • Die Digitalisierung von Zeitplänen für bestimmte Komponenten ist gelungen. • Gebäude werden meist mit Wärmepumpen betrieben. 	<ul style="list-style-type: none"> • Im Jahr 2045 nimmt die serielle Sanierung Gestalt an. • Auf Niedertemperatur-Fernwärme wird verzichtet. • Die Digitalisierung der Fahrpläne wird nicht entwickelt. • Gebäude werden meist mit fossilen Energieträgern betrieben.
<p>Kategorie 2</p> <p>Integration des einzelnen Gebäudes in das Gesamtsystem</p>	<ul style="list-style-type: none"> • DSM⁹-Technologien werden von den meisten großen Stromverbrauchern eingesetzt. • Smart Meter¹⁰ sind weit verbreitet. 	<ul style="list-style-type: none"> • Keine Flexibilität in den Gebäuden vorhanden, sondern nur in großen zentralen Speicherungen. • Smart Meter werden teilweise in Neubauten eingesetzt. 	<ul style="list-style-type: none"> • Keine Flexibilität ist vorhanden. • Smart Meter werden selbst in Neubauten nicht eingesetzt.
<p>Kategorie 3</p> <p>Neubau als Innovationsstreiber</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Hohe Effizienzsteigerung im technologischen Fortschritt. • Ein klimaneutraler Betrieb ist bei Neubauten verpflichtend und wird bei Bestandsgebäuden teilweise umgesetzt. • Solarpflicht wird für alle Neubauten (80 % der Dachfläche) umgesetzt. 	<ul style="list-style-type: none"> • Mittlere Effizienzsteigerung im technologischen Fortschritt. • Bei Neubauten ist ein klimaneutraler Betrieb verpflichtend. • Solarpflicht wird für alle Neubauten (60 % der Dachfläche) umgesetzt. 	<ul style="list-style-type: none"> • Geringe Effizienzsteigerung im technologischen Fortschritt. • Ein klimaneutraler Betrieb ist nicht zwingend erforderlich. • Solarverpflichtung wird nicht durchgesetzt.
<p>Kategorie 4</p> <p>Regulierungsrahmen</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Die Finanzierungsmittel für die Förderung des klimaneutralen Bauens und der Wärmeerzeuger sind gut verteilt. • Mindestens 80 % EE¹¹ in jedem neu installierten Heizsystem. • Anforderungen nach KfW EH 75 für die Sanierung von Bestandsbauten. 	<ul style="list-style-type: none"> • Die Finanzierungsmittel sind nicht gut verteilt und es fehlt an langfristiger Orientierung. • Mindestens 65 % EE in jeder neu installierten Heizungsanlage. • Anforderungen der KfW EH 100 für die Sanierung von Bestandsbauten. 	<ul style="list-style-type: none"> • Die Finanzierungsmittel sind begrenzt und dienen nur spezifischen Zielen. • Keine Verschärfung der aktuellen EE-Anforderungen. • Keine Verschärfung der aktuellen Anforderungen an die Gebäudeeffizienz
<p>Kategorie 5</p> <p>Gesellschaft und Wirtschaft</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Es gibt genügend Fachkräfte. • Die Lieferketten sind gut gemanagt. 	<ul style="list-style-type: none"> • Das Angebot an Fachkräften liegt hinter dem Zielniveau. • Die Lieferketten werden teilweise gemanagt. 	<ul style="list-style-type: none"> • Deutlicher Mangel an Fachkräften. • Die Lieferketten werden nicht gut gemanagt. • Die Ungleichheiten sind deutlich größer.

⁹ Demand Side Management

¹⁰ Intelligente Messsysteme

¹¹ Erneuerbare Energien

- Ungleichheiten werden verringert und Subventionen werden für die richtigen Zielgruppen gewährt.
- Die Idee des gemeinschaftlichen Wohnens wird immer beliebter.
- Die Ungleichheiten haben nicht abgenommen.
- Die Zahl der Senioren-Haushalte steigt, während die übrigen Haushalte stabil bleiben.
- Die Zahl der Einpersonenhaushalte nimmt zu, was zu einem höheren Bedarf an Wohnraum führt.

3.4.5.2 Modellierung

Die Modellierung der Szenarien wurde in einem iterativen Prozess und parallel zur Szenarientwicklung durchgeführt. Dazu gehörten die Sammlung und Vervollständigung der Datensätze, die Weiterentwicklung des Modells zur Integration der Anforderungen der Szenarien, die Simulation und die Kalibrierung der Ergebnisse. Der Prozess wurde durch den Austausch mit anderen APs begleitet, um den Input zu erhalten und zu integrieren, sowie durch Workshops, um Input zu sammeln oder den Status zu validieren.

3.4.5.2.1 Modell

Das agentenbasierte Modell RENDER-Building¹² wurde verwendet, um die Transformationspfade des Gebäudesektors in Form von Szenarien zu erforschen. Die Energiewende des Gebäudesektors wird grundlegend von den verschiedenen Entscheidungsträger:Innen vorangetrieben. Das Verhalten der Entscheidungsträger:Innen sowie die Eigenschaften der Gebäude, die sie besitzen oder nutzen, sind sehr heterogen. Das agentenbasierte Modell berücksichtigt die Heterogenität des Gebäudebestands, modelliert den Entscheidungsprozess auf der Grundlage von Prinzipien der „bounded-rationality“ (begrenzte Rationalität) und erfasst die Systemperspektive durch die Handlungen der einzelnen Akteure.

Entsprechend der von Yu et al. [121] vorgeschlagenen allgemeinen Struktur besteht das Modell aus zwei Hauptkomponenten: Die erste ist „Building Agents“, eine Liste von Agenten, die den Gebäudebestand repräsentieren, und die zweite ist „Environment“, das die Interaktion und Entscheidungsprozesse der Agenten koordiniert und die Ergebnisse auf Makroebene speichert.

Gebäude-Agenten

Jedem Agenten werden zunächst vier grundlegende IDs zugewiesen und dann für die weitere Initialisierung verwendet: Region, Sektor, Subsektor und Gebäudetyp. Jede Kombination dieser vier Basis-IDs entspricht einem Segment des Gebäudebestands, für das wir die Anzahl der Gebäude (N_{real}) schätzen. Im Modell werden 5 % der Gebäude in Deutschland durch Gebäude-Agenten repräsentiert, was bedeutet, dass die Anzahl der durch das Modell generierten Agenten (N_{model}) wie folgt gegeben ist:

$$N_{model} = 5\% \times N_{real} - \text{Agenten}$$

Diesen Gebäude-Agenten werden weiterhin die heterogenen Eigenschaften über Bauzeit, Standorttyp, Gebäudegröße (Gebäudehöhe und Anzahl der Einheiten) und Bauteilwirkungsgrade zugeordnet. Basierend auf den Eigenschaften des Gebäudes wird der Wärme- und Kältebedarf für das Gebäude in stündlicher Auflösung nach dem 5R1C-Ansatz nach DIN ISO 13790 berechnet. Der berechnete Wärmebedarf entscheidet über die Effizienzklasse des Gebäudes. Jeder Wohn- oder Arbeitseinheit innerhalb des Gebäudes ist die Anzahl der Personen zugeordnet, die jeweils mit ihrem Energiebedarf für Geräte und Warmwasserbedarf konfiguriert sind.

¹² RENDER ist ein agentenbasiertes Modellierungsframework (eneRgy dEmaNd moDeling framEwoRk), das mit den beiden Python-Paketen *Melodie* [121] und *tab2dict* entwickelt wurde. RENDER-Building ist ein Gebäudebestandsmodell in diesem Framework.

Die Inputdaten für die Modellierung wurden einheitlich anhand verschiedener Statistiken und empirischer Datensätze zum Gebäudebestand entwickelt. Zu den verwendeten Datenquellen gehören der Zensus 2011 [122], der Global Human Settlement Layer (GHSL) [123, 124, 125], die öffentlich zugänglichen Berichte des Instituts für Wohnen und Umwelt (IWU) [126, 127] sowie der Deutschen Energie-Agentur (dena) [128]. Die Methodik ist in [129] ausführlich erläutert.

Ablauf der Simulation

Das Modell wird mit einer Datenbank eingeführt, die aus Daten über die folgenden Themen besteht: Gebäude- und Technologiebestand, Nutzungsverhalten sowie die Entwicklung von Richtlinien, Vorschriften, Preisen für Energieträger, Technologiekosten und -subventionen, Technologieeffizienzen und Wetterprofilen. Den Gebäude-Agenten sind Eigenschaften zugeordnet und sie unterliegen den Bedingungen, die durch diese Inputdaten bestimmt werden. Das Environment koordiniert die Gebäude-Agenten, die in jedem Simulationsjahr eine Reihe von Prozessen durchlaufen. Nach der Initialisierung werden die Gebäude-Agenten mit Informationen über den Renovierungsstatus, die Heizungssysteme, den Energie- und Warmwasserbedarf der Geräte, die Einführung anderer Technologien sowie die Verfügbarkeit der Infrastruktur an ihrem Standort aktualisiert. Danach werden Altbauten abgerissen und Neubauten entsprechend der soziodemografischen Entwicklung errichtet. Schließlich werden auf der Grundlage aller Daten - sowohl der Gebäude-Agenten als auch des Environment - die Output-Dateien erstellt. Diese umfassen den Endenergiebedarf nach Energieträger und Anwendung, die CO₂-Emissionen, sowie die Informationen zu Sanierungsmaßnahmen von Gebäuden und deren Heizungsanlagen, einschließlich Kosten und energetische Auswirkungen. Zudem werden umfassende Informationen zu jedem Gebäude-Agenten in jedem Simulationsjahr bereitgestellt. Die Gesamtstruktur des Modells ist in Abbildung 46 dargestellt.

Für die Kalibrierung und Validierung des Modells wurden mehrere Datenquellen herangezogen, darunter empirische Studien zu technischen und verhaltensbezogenen Parametern [130, 131], zum Endenergieverbrauch in Wohn- und Nichtwohngebäuden [132, 133], Hochrechnungen von Destatis zum Wohngebäudebestand [134], Daten aus Studien und öffentlich zugänglichen Berichten des IWU [126] und der dena [128].

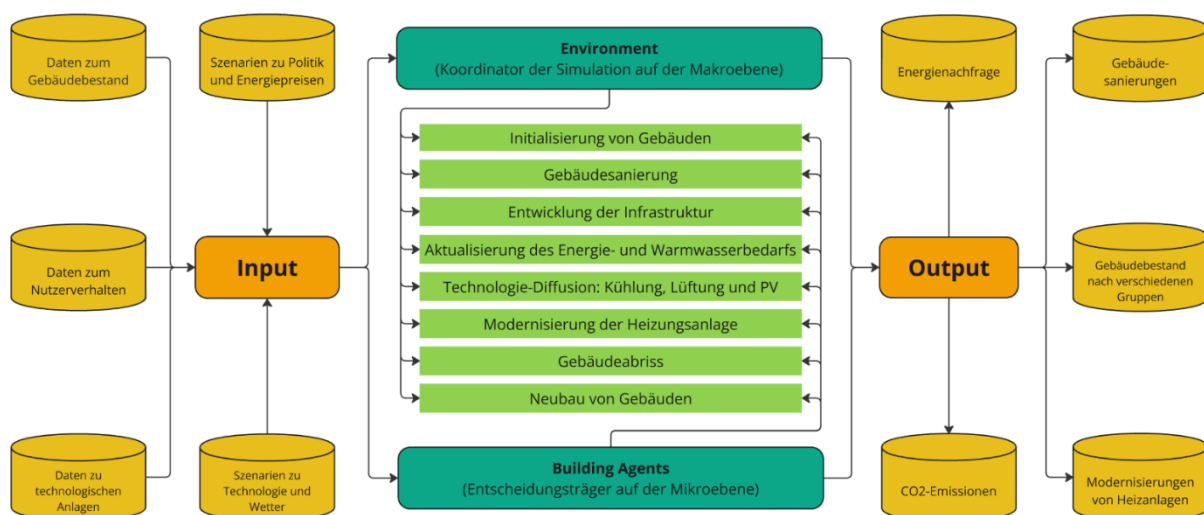


Abbildung 46: Arbeitsablauf von RENDER-Building

3.4.5.2.2 Quantifizierung der Szenarien

Die qualitative Beschreibung der Szenarienfunde entsprechend den in Tabelle 22 dargestellten thematischen Kategorien wurde dann in quantitative Annahmen umgewandelt, die als Szenarioannahmen in

das Modell einfließen. Tabelle 22 fasst die Szenarioannahmen unter relevanten Aspekten und deren Behandlung durch die entsprechenden Modellmerkmale zusammen.

Tabelle 22: Szenarioannahmen unter relevanten Aspekten und Umgang im Modell (Merkmal)

Aspekt	STS	CTS	LTS	Merkmal des Modells
Mindestanforderungen für die Gebäudesanierung ab 2025	Nur niedriger U-Wert	Niedriger bis mittlerer U-Wert	Niedriger bis mittelhoher U-Wert	Marktverfügbarkeit von Dämmmaßnahmen in Abhängigkeit von ihrem Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Wert)
Handwerkliche Kapazität und Rentabilität von Handwerksunternehmen	Ausreichendes Angebot an Fachkräften	Ausreichendes Angebot an Fachkräften in den meisten Regionen	Unzureichendes Angebot an Fachkräften in den Regionen	Erfassung des Bedarfs von Handwerker*innen an Renovierungsarbeiten
Serielle Sanierung – Gesamtkosten ¹³	10 % weniger	5 % höher	20 % höher	Gesamte Sanierungskosten im Verhältnis zur konventionellen Sanierung ab 2030
Regulatorische Beschränkungen für neue Heizungsanlagen	80 %	65 %	n. a.	Mindestbedarf an erneuerbarer Energie aus dem Heizungssystem
Nutzung von Fernwärme (FW)	30 % FW-Ausbau	20 % FW- Ausbau	10 % FW- Ausbau	Verfügbarkeit der Infrastruktur (bis 2035)
Förderprogramme – Sanierung Gebäudehülle	Bis zu 75 %	Bis zu 50 %	Bis zu 30 %	Höhe der Zuschüsse zu den Investitionskosten von Renovierungsmaßnahmen
Förderprogramme – Modernisierung Heizung	Bis zu 60 %	Bis zu 45 %	Bis zu 30 %	Höhe der Zuschüsse zu den Investitionskosten von Heizungsmodernisierungsmaßnahmen
Emissionshandelssystem (ETS II)	230 EUR/tCO ₂	175 EUR/tCO ₂	115 EUR/tCO ₂	CO ₂ -Preis bis 2050
Einsatz von Photovoltaik (PV)	80 %	50 %	20 %	Durchdringungsrate von PV-Modulen im Gebäudebestand
	Verpflichtend nach 2025	Verpflichtend nach 2025	Nicht obligatorisch	Einführung von PV-Modulen im Neubau
Eigenverbrauch von PV	50 %	30 %	15 %	Eigenverbrauchsquote von PV-Strom
Effizienzgewinne	Hoch (40 %)	Mittel (25 %)	Niedrig (15 %)	Effizienzsteigerungen bei Geräten bis 2050 (im Durchschnitt im Vergleich zu 2020)
Haushaltsgröße	Rückgang um 25 %	Bleibt gleich	Steigerung um 12 %	Anteil der Einpersonenhaushalte im Jahr 2050 im Vergleich zu 2020

3.4.5.2.3 Ergebnisse und Diskussion

Der aus der Modellierung resultierende Endenergiebedarf, die Sanierungsrate und die CO₂-Emissionen des Gebäudesektors bei jedem Transformationspfad werden in den folgenden Abschnitten zusammengefasst und diskutiert.

¹³ In den Gesamtkosten sind Planungs- und Materialkosten sowie die Realisierungszeiten und handwerklichen Ansprüche enthalten. Die Unterschiede zwischen serieller und konventioneller Sanierung beeinflusst die Modellscheidungen dahingehend, dass das Model für jeden Gebäudeagenten und jedes Szenario eine dieser Sanierungsarten bevorzugt. Das bedeutet, dass wenn serielle Sanierung in einem Szenario als kostengünstiger angesehen wird, diese Sanierungsart häufiger ausgewählt wird.

Endenergiebedarf

Der Endenergiebedarf des Sektors sinkt von rund 1135 TWh im Jahr 2020 auf etwa 740 (STS), 780 (CTS) bzw. 810 (LTS) TWh im Jahr 2050. Dies entspricht einer Reduktion von 35 % unter STS und rund 30 % unter CTS und LTS. Der größte Teil des Rückgangs ist auf die Verbesserung der thermischen Performance von Gebäuden zurückzuführen. Der Raumwärmebedarf wird bis 2050 im Vergleich zu 2020 unter STS, CTS und LTS um rund 45, 40 bzw. 35 % gesenkt. Abbildung 47 zeigt die Entwicklung des Endenergiebedarfs von Gebäuden anhand von Szenarien bis 2050.

Die Zunahme der Elektrifizierung ist in allen Szenarien offensichtlich, wobei ihr Anteil von 30 % im Jahr 2020 auf 52 % bei STS, 47 % bei CTS und 40 % bei LTS bis 2050 steigt. Wir sehen auch einen Anstieg des Anteils der Fernwärme. Er beträgt 10 % des Gesamtbedarfs unter STS, rund 9 % unter CTS und rund 8 % unter LTS. Der Hauptunterschied zwischen den Szenarien wird sichtbar, wenn man die verbleibenden fossilen Brennstoffe betrachtet. Der Gesamtbedarf an fossilen Brennstoffen im Jahr 2050 beläuft sich auf etwa 70 TWh unter STS, rund 140 TWh unter CTS und rund 230 TWh unter LTS. Mit den optimistischen Trends und der Einhaltung der Vorschriften in STS werden rund 12 % der heutigen fossilen Brennstoffe in diesem Sektor weiterhin verwendet. Dies ist auf einen begrenzten Einfluss auf den Austausch der Heizungsanlage zurückzuführen, wenn die Heizungsanlage das Ende ihrer Lebensdauer noch nicht erreicht hat. Zusätzliche Herausforderungen und Störungen bei der Umstellung führen dazu, dass mehr fossile Heizsysteme verbleiben und sich somit der verbleibende Bedarf an fossilen Brennstoffen im Jahr 2050 von STS auf CTS und von CTS auf LTS verdoppelt.

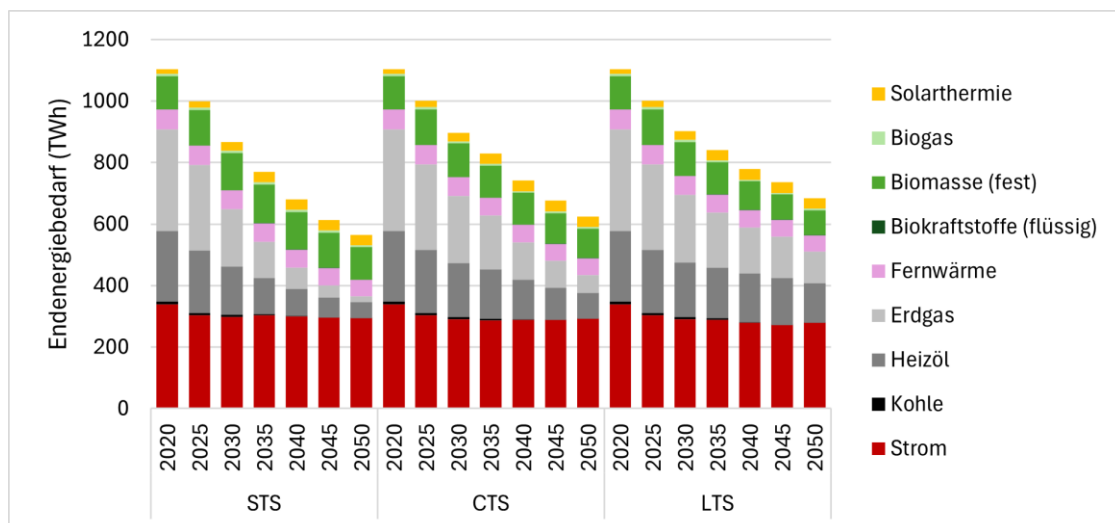


Abbildung 47: Entwicklung des Endenergiebedarfs des deutschen Gebäudesektors gemäß den Szenarien STS, CTS und LTS. Der in dieser Abbildung dargestellte Endenergiebedarf schließt die für Wärmepumpen verwendete Umgebungswärme aus.

Sanierungsrate

Die Sanierungsrate gibt den Grad der energetischen Sanierungen an, die an der Gebäudehülle durchgeführt wird [135]. Die in vorherigen Abschnitt beschriebene Reduzierung des Raumwärmebedarfs ergibt sich aus einer Kombination von dynamischen Bedingungen, wie beispielsweise der Verringerung der Heizgradtage durch sich ändernde Wetterbedingungen, der Effizienzsteigerung der verfügbaren Heizsysteme und Gebäudekomponenten im Bestand sowie der Änderung des Nutzungsverhaltens. Die Sanierungsrate zeigt hingegen den reinen Aufwand für die Sanierung der Gebäudehülle.

Abbildung 48 stellt die durchschnittliche bauteilflächenbezogene Sanierungsrate von Wohn- und Nichtwohngebäuden dar. Dieser Indikator wird berechnet, indem das Verhältnis der Fläche der sanierten Bauteile zur Gesamtfläche des Bauteils im Bestand genommen wird. Die Szenarien zeigen leicht

höhere Sanierungsraten bei Nichtwohngebäuden und einen stetig steigenden Trend bis 2050. Während der Unterschied zwischen den Szenarien bis 2030 gering ist, sind bis 2050 bis zu 0,15 % Unterschied bei der Sanierungsrate sichtbar.

Obwohl nicht alle Sanierungsmaßnahmen in Gebäuden immer zu Effizienzsteigerungen führen, sehen die Szenarien lediglich Sanierungen vor, die die thermische Performance der Gebäudehülle verbessern. Daher trägt eine höhere Sanierungsrate bis 2050 wesentlich zur stärkeren Reduzierung des Wärmebedarfs im STS bei. Die Höhe der Subventionen und strengere Vorschriften für die Gebäudeenergieeffizienz sind die Haupttreiber, die die Höhe der Einsparungen beim Energiebedarf steuern.

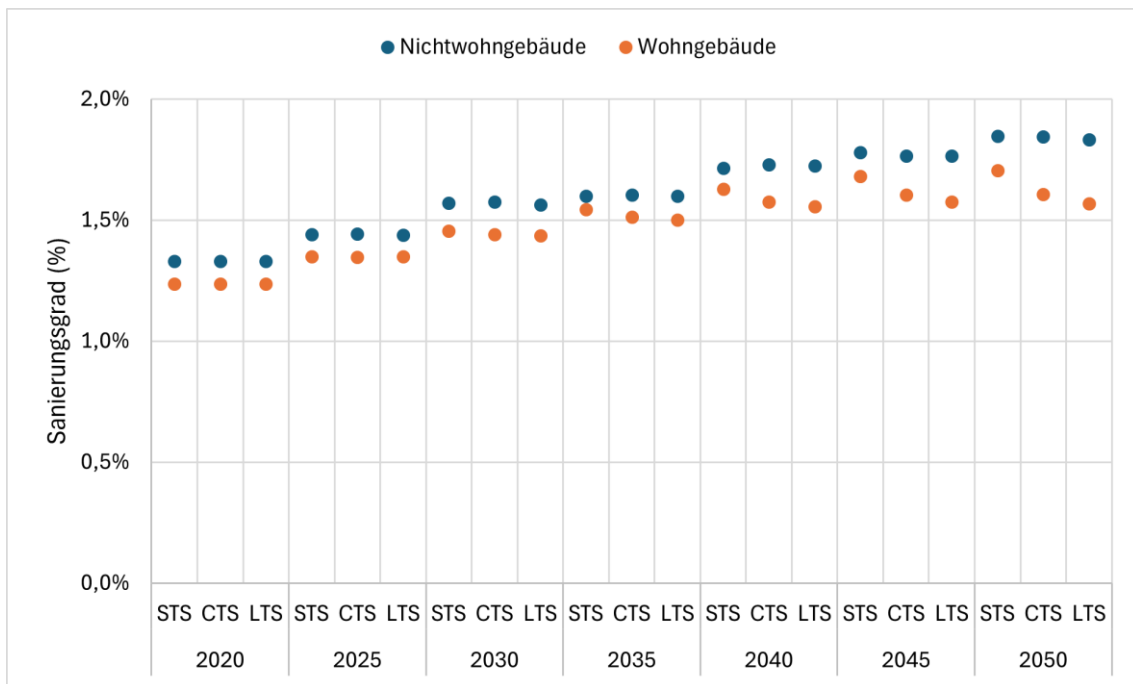


Abbildung 48: Durchschnittliche bauteilflächenbezogene Sanierungsrate von Gebäuden gemäß den Szenarien STS, CTS und LTS

CO₂-Emissionen

Infolge der verbleibenden fossilen Brennstoffe wird in keinem Szenario bis 2045 oder 2050 eine vollständige Dekarbonisierung des Energiebedarfs erreicht. Darüber hinaus belaufen sich die gesamten direkten Emissionen im Jahr 2030 im Rahmen von STS auf 82 Mio. t CO₂-Äquivalente, was immer noch 15 Mio. t CO₂-Äquivalente über dem sektoralen Ziel liegt, das sich das Bundes-Klimaschutzgesetz gesetzt hat. Im begrenztesten Szenario (LTS) wird der Gebäudesektor im Jahr 2050 immer noch 55 Mio. t CO₂-Äquivalente ausstoßen. Abbildung 49 zeigt die Entwicklung der direkten CO₂-Emissionen in jedem Szenario.

Es ist wichtig zu erwähnen, dass die indirekten CO₂-Emissionen, also die in die zentrale Strom- und Wärmeversorgung eingebetteten Emissionen, nicht im Rahmen der analysierten Emissionen betrachtet werden. Daher wird angenommen, dass eine schrittweise Dekarbonisierung des Mixes dieser zentralen Energieträger bis 2045 durch den Versorgungssektor sichergestellt wird.

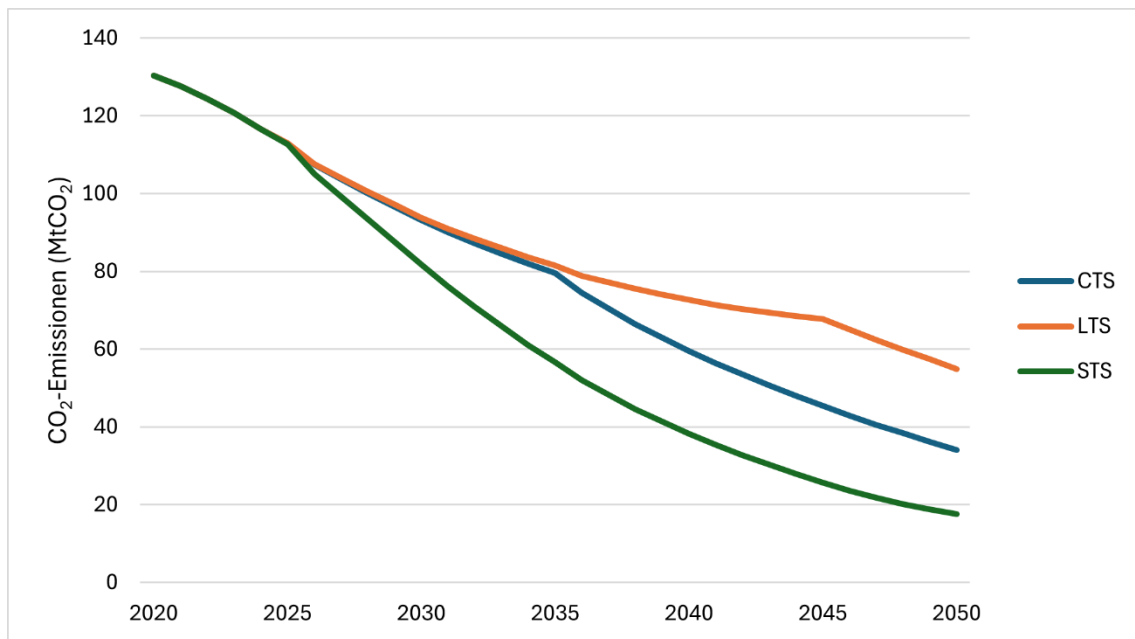


Abbildung 49: Entwicklung der direkten CO₂-Emissionen des deutschen Gebäudesektors gemäß den Szenarien STS, CTS und LTS.

Schlussfolgerungen

Eine szenariobasierte Analyse wurde durchgeführt, um die Reduktion des Energiebedarfs und der direkten CO₂-Emissionen zu quantifizieren, die im Gebäudesektor in Deutschland erreicht werden könnte. Aus der Analyse werden folgende Schlussfolgerungen gezogen:

- Bis 2050 ist eine Reduzierung des Endenergiebedarfs um 30 bis 35 % im Vergleich zu 2020 möglich.
- Der Raumwärmebedarf kann bis 2050 um 35 bis 45 % im Vergleich zu 2020 gesenkt werden.
- Eine Erhöhung der Sanierungsrate von zuletzt 1,2 % auf mindestens 1,8 % ist notwendig, um die Transformation des Gebäudebestands zu erreichen. Förderungen von bis zu 75 % auf die Kosten für die Sanierung der Gebäudehülle führen dazu, dass das Szenario der nachhaltigen Transformation (STS) den niedrigsten Energiebedarf unter den Szenarien aufweist.
- Die Zunahme der Elektrifizierung ist in allen Szenarien offensichtlich, ihr Anteil wird bis 2050 zwischen 40 und 52 % liegen. Die Elektrifizierung der Wärme durch Wärmepumpen wird bis 2050 voraussichtlich zwischen 35 und 55 % des gesamten Wärmebedarfs ausmachen. Förderungen von bis zu 60 % auf die Investitionskosten von Modernisierungen für erneuerbare Heizungsanlagen führen dazu, dass das STS die niedrigsten Emissionen unter den Szenarien aufweist.
- Eine vollständige Dekarbonisierung des Energiebedarfs wird in keinem Szenario bis 2045 oder 2050 erreicht. Darüber hinaus liegen die gesamten direkten Emissionen im Jahr 2030 im Rahmen des STS immer noch 15 Mio. t CO₂-Äquivalente über dem sektoralen Ziel, das sich das Bundes-Klimaschutzgesetz gesetzt hat. Im begrenztesten Szenario (LTS) wird der Sektor im Jahr 2050 immer noch 55 Mio. t CO₂-Äquivalente ausstoßen.
- Die Austauschrate von Bestandsheizsystemen wird als wichtigstes Hindernis für das Erreichen des Dekarbonisierungsziels im Gebäudesektor identifiziert. Wenn die Szenarien allein auf das technische Ende der Lebensdauer setzen, um fossile Heizungen zu ersetzen, reicht der Zeitraum bis 2045 oder 2050 nicht aus, um alle fossilen Heizsysteme auf erneuerbare Heizsysteme umzustellen.

- Weitere Untersuchungen sind erforderlich, um zusätzlichen Maßnahmen zu identifizieren die Szenarien zu einer Dekarbonisierung führen, wie z. B. ein breiterer Ansatz von Bio- oder E-Fuels, welche fossile Brennstoffe ersetzen, und Verhaltensanreize für einen frühzeitigen Austausch fossiler Heizsysteme. Die politischen Auswirkungen dieser Maßnahmen sollten ebenfalls erörtert werden.
- Auch der Bedarf an Arbeitskräften und Material entlang der Transformationspfade sollte thematisiert werden, idealerweise im Vergleich zu den vorhandenen und geplanten Kapazitäten.

Der Austausch mit anderen APs, der bei der Entwicklung von Szenarien begann, wurde auch bei der Modellierung fortgesetzt, und die Beiträge wurden in die Modellierung integriert. Die gesammelten und veröffentlichten Realisierungszeiten von Modernisierungsmaßnahmen (aus AP 4.1) flossen als Input in das agentenbasierte Modell ein. Die Berechnung des Arbeitsbedarfs und der damit verbundenen Kosten hängt von diesem Input ab. Die Zuschüsse für Modernisierungsmaßnahmen wurden schrittweise erhöht, da das Ambitionsniveau der Renovierungsmaßnahme steigt (gemäß dem Ergebnis von AP 4.1). Effizienzgewinne, die durch hohe Forschungsaktivitäten für neue Technologien erzielt wurden, sowie Kostenvorteile, die durch technologisches Lernen erzielt wurden, wurden in enger Diskussion und Abstimmung mit AP 4.2 als Input für das agentenbasierte Modell aufbereitet. Es wurde ein Modell entwickelt, bei dem die Betriebseffizienz von Wärmepumpen mit der Effizienzklasse des Gebäudes variiert (durch die sich ändernde Vorlauftemperatur) und die Betriebseffizienz von Gebäuden mit intelligenter Steuerung über Smart Energy Management System (SEMS) variiert (AP 4.3).

Die Modellierung profitierte auch von Beiträgen und Rückmeldungen in Workshops und Konferenzen. Die Storyline der entwickelten Szenarien sowie die Struktur des agentenbasierten Gebäudebestandsmodells wurden in einem Workshop im Rahmen des Projekttreffens in Kassel (April 2024) vorgestellt. Ergänzt wurde dies durch einen ausführlichen Austausch mit den Teilnehmenden zu Modellierungsmethoden, Datenquellen und fehlenden Aspekten, die einen wesentlichen Einfluss auf die Dekarbonisierung von Gebäuden haben könnten. Die Ergebnisse des Workshops wurden genutzt, um das Modell weiter zu verbessern. Beispielsweise wurde die Wärmepumpeneffizienz als Funktion der Vorlauftemperatur hinzugefügt, um den Betrieb von Wärmepumpen besser im Modell abbilden zu können. Außerdem wurde (in Kombination mit den Ergebnissen aus AP 4.3) die mögliche Effizienzsteigerung durch intelligentes Management als neue Technologie eingeführt. Die Parameter für Investitionsentscheidungen wurden weiter angepasst, um den Einfluss des Bevölkerungsalters und Einkommensniveaus zu berücksichtigen. Mit dem Feedback aus der Vorstellung der Ergebnisse auf der ECEMP¹⁴ konnten wissenschaftliche Erkenntnisse über den Einfluss von Nutzereigenschaften auf Investitionsentscheidungen gewonnen werden. Diese Merkmale können z. B. die Art des Eigentums, die Altersgruppe, das Einkommensniveau sein. Das Modell wurde weiterentwickelt, um dieser Anpassung der Entscheidungsfindung Rechnung zu tragen (auch Ergebnis aus AP 4.1).

Die Methoden und Ergebnisse der Gebäudebestandsentwicklung wurden 2024 auf der eceee-Konferenz vorgestellt und als wissenschaftliche Arbeit veröffentlicht [136]. Die Ergebnisse der Quantifizierung des Energiebedarfs und CO₂-Emissionen gemäß den entwickelten Szenarien wurden in Form eines kurzen Papers bereits veröffentlicht [137]. Eine Journal-Publikation als Proceedings der ECEMP 2024 ist ebenfalls geplant und in Bearbeitung.

3.4.5.3 Visualisierung der Szenarienergebnisse: Szenariengenerator

Die Ergebnisse der Szenarienbetrachtung sind in einem interaktiven, webbasierten Tool – dem Szenariengenerator¹⁵ – visualisiert. Fraunhofer ISI hat das Konzept und die Inhalte für das Tool bereitgestellt,

¹⁴ <https://www.ecemf.eu/ecemp/ecemp-2024/>

¹⁵ <https://scenario-generator.eonerc.rwth-aachen.de/de/>

während die RWTH Aachen die Entwicklung und das Hosting übernommen hat. Der Szenariengenerator wurde zudem in die von BF-Modul IV entwickelte Wissensplattform integriert.

Ein regelmäßiger Austausch mit dem Entwicklungsteam war vorgesehen, um das Design, die Funktionalität und die Benutzerfreundlichkeit der verfügbaren Optionen sicherzustellen. Die frühere Version des Szenariengenerators wurde in einem Workshop auf der eceee-Konferenz 2024 vorgestellt, und das Feedback der Teilnehmenden wurde zur Verbesserung herangezogen. Das Tool wurde mit den vorläufigen Ergebnissen getestet, um die Funktionalität zu überprüfen. Neben den Szenarienergebnissen stehen auch Informationen zu den Szenarientwicklungen und -annahmen sowie eine Modellbeschreibung für die Nutzenden zur Verfügung.

In diesem interaktiven Tool haben die Nutzenden die Möglichkeit, die gewünschte Kombination aus Sektor, Anwendung und Energieträger auszuwählen und die jährliche Entwicklung des Endenergiebedarfs oder der CO₂-Emissionen zu visualisieren (s. Abbildung 50). Die zu Auswahl stehenden Optionen in jeder Kategorie sind in Tabelle 23 aufgelistet.

The screenshot displays a user interface for a scenario generator tool, organized into four distinct selection panels arranged in a 2x2 grid. Each panel contains a list of options with radio buttons for selection.

- Output:** Two options are visible: 'Endenergiebedarf' (unselected) and 'CO₂-Emissionen' (selected, indicated by a green checkmark).
- Sektoren:** Two options are visible: 'Wohngebäude' (unselected) and 'Nichtwohngebäude' (selected, indicated by a green checkmark).
- Anwendungen:** Five options are visible: 'Geräte und Prozesse' (unselected), 'Raumkühlung' (unselected), 'Raumwärme' (selected, indicated by a green checkmark), 'Warmwasser' (unselected), and 'Lüftung' (unselected).
- Energieträger:** Ten options are visible: 'Strom' (selected, indicated by a green checkmark), 'Heizöl, leicht' (unselected), 'Steinkohle' (unselected), 'Erdgas' (unselected), 'Biomasse (fest)' (unselected), 'Fernwärme' (unselected), 'Solarenergie' (unselected), 'Umweltwärme' (unselected), and 'Biogas' (unselected).

Abbildung 50: Screenshot vom Tool

Tabelle 23: Auswahlmöglichkeiten für den Szenariengenerator

Kategorien	Auswahl
Output	Endenergiebedarf, CO ₂ -Emissionen
Szenarien	Szenario A, Szenario B, Szenario C
Sektoren	Wohngebäude, Nichtwohngebäude (Gebäude der Sektoren A-S gemäß NACE, Rev. 2)
Anwendungen	Geräte und Prozesse (einschließlich Geräte, Beleuchtung, IKT, mechanische Energie, Prozesskühlung und Prozesswärme), Raumkühlung, Lüftung, Raumwärme, Warmwasser
Energieträger	Strom, Heizöl (leicht), Steinkohle, Erdgas, Biomasse (fest), Fernwärme, Solarenergie, Umweltwärme, Biogas, Heizöl (schwer), Biokraftstoffe (flüssig)

Die Szenarienergebnisse werden in zwei Formaten präsentiert. Die Deutschlandkarte in Abbildung 51 veranschaulicht die Ergebnisse eines gewählten Szenarios in NUTS-2-Regionen [138]. Die farbliche Skala (von Rot bis Grün) ermöglicht den Vergleich zwischen verschiedenen Jahren und Szenarien. Je grüner die Darstellung, desto geringer der Energiebedarf bzw. die CO₂-Emissionen. Mithilfe eines Schiebereglers können die Nutzenden schnell und unkompliziert zwischen den Jahren wechseln und die Entwicklung des Energiebedarfs oder der CO₂-Emissionen beobachten. Das Liniendiagramm (Abbildung 52) ermöglicht den gleichzeitigen Vergleich der drei Szenarien auf Landesebene. Die visualisierten Szenarienergebnisse können außerdem als Excel-Datei heruntergeladen werden.

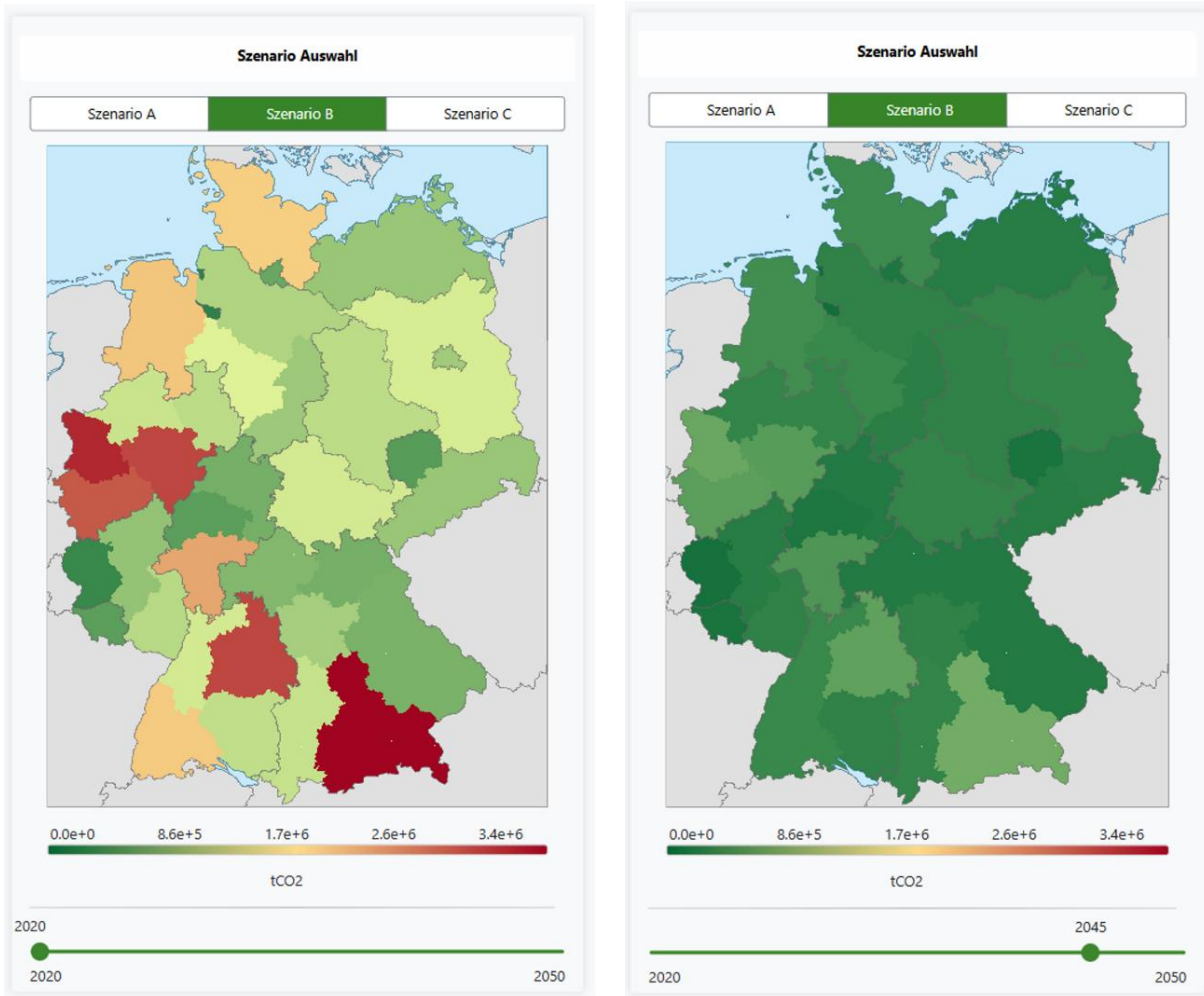


Abbildung 51: Exemplarische Sicht der Deutschlandkarte: Die CO₂-Emissionen basierend auf Erdgas für die Raumwärme im Gebäudesektor (WG und NWG) im Szenario B für die Jahre 2020 (links) und 2045 (rechts)

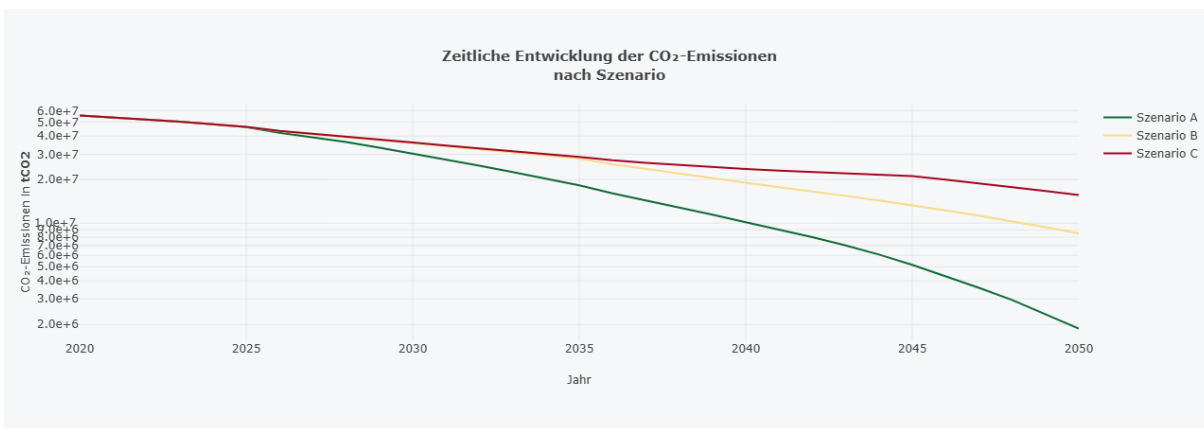


Abbildung 52: Exemplarische Sicht des Liniendiagramms: Die Entwicklung der CO₂-Emissionen basierend auf Erdgas für die Raumwärme im Gebäudesektor (WG und NWG) in allen Szenarien zwischen 2020 und 2050.

3.5 Arbeitspaket 5 (AP 5): Betrachtungen regulatorischer Rahmenbedingungen

In AP 5 wurde der Einfluss regulatorischer Rahmenbedingungen auf die Umsetzung von energetischen Maßnahmen an Gebäuden untersucht. Diese spielen neben der technischen Umsetzbarkeit eine große Rolle für eine erfolgreiche Energiewende. Schwerpunktmäßig wurden in diesem AP bestehende Hemmnisse durch regulatorische Rahmenbedingungen aufgezeigt und Anpassungsvorschläge gemacht. Zu den regulatorischen Rahmenbedingungen werden auf der einen Seite Richtlinien, Normen, Gesetze und Verordnungen gefasst, auf der anderen Seite wird auch die Förderlandschaft hinzugezogen. Innerhalb des AP wurden folgende Punkte durch das EBC der RWTH Aachen und Fraunhofer IBP untersucht:

- Analyse der regulatorischen Rahmenbedingungen und der zugehörigen Anpassungs- und Erweiterungsvorschläge in der Literatur
- Auswertung der Forschungslandschaft bzgl. der regulatorischen Rahmenbedingungen
- Analyse von zentralen regulatorischen Rahmenbedingungen in Berechnungsmodellen

<p>Ziele des Arbeitspakets</p> <ul style="list-style-type: none"> • Zusammenstellung der für den Gebäudebereich relevanten regulatorischen Rahmenbedingungen • Identifizierung der Rolle von regulatorischen Rahmenbedingungen in Forschungsprojekten • Ermittlung der Herausforderungen und Auswirkungen von regulatorischen Rahmenbedingungen auf spezielle Technologien
<p>Methoden</p> <ul style="list-style-type: none"> • Literaturrecherche zu relevanten regulatorischen Rahmenbedingungen und Anpassungsvorschlägen • Austausch mit Partnern aus der Praxis, der Wohnungswirtschaft und Vertreter:Innen der Mieter:Innen und Vermieter:Innen; z. B. beim Fokustreffen • Analyse der Projektlandschaft in Bezug auf den regulatorischen Rahmen durch Auswertung von Umfrageergebnissen • Durchführung von Optimierungen unter besonderer Berücksichtigung von Randbedingungen, welche die Regulatorik abbilden
<p>Ergebnisse:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Veröffentlichung: Übersichtspapier zu regulatorischen Rahmenbedingungen im Forschungsbereich Energiewendebauen sowie Vorschlägen zur Beseitigung regulatorischer Hemmnisse. • Anpassung der regulatorischen Rahmenbedingungen: es existieren bereits viele durchdachte Anpassungs- und Erweiterungsvorschläge für die Regulatorik, welche Vorteile gegenüber der aktuellen Regulatorik aufweisen. Diese betreffen die energetischen Mindeststandards, mietrechtliche Regelungen und die Emissionsbepreisung. Anpassungsvorschläge zielen darauf die Regulatorik sozialverträglicher zu machen und die Verbesserung der Energieeffizienz zu stärken • Forschungslandschaft: Die Regulatorik beeinflusst alle Projekte und spielt dadurch indirekt eine Rolle, auch wenn eine Betrachtung der Regulatorik nicht explizit Teil der Projekte war. Besonders bezogen auf neue Technologien können Anpassungen in der Regulatorik dazu beitragen, diese schneller oder überhaupt in der Praxis zu verbreiten • Berechnungsmodelle: Die Optimierungsergebnisse zeigen die große Abhängigkeit der Wirtschaftlichkeit einer energetischen Sanierung vom Verhältnis der Gas- zu Stromkosten. Gleichzeitig konnte jedoch gezeigt werden, dass durch gezielte Förderung von Technologien, diese Energiesysteme schnell wirtschaftlich werden. Eine angepasste und angemessene Förderung stellt einen guten Hebel dar, um den Ausbau erneuerbarer Technologien zu stärken und die Emissionen im Gebäudesektor dadurch zu senken.

Im Rahmen des AP wurde eine Übersicht über die aktuelle, für den Gebäudebereich relevante, Regulatorik zusammengestellt, welche besonders zu Herausforderungen bei der Umsetzung von energetischen Maßnahmen im Gebäudebereich führen. Zusätzlich wurden auch spezifische Hemmnisse in Be-

zug auf wichtige Technologien zusammengestellt. Zu den Technologien, welche im Rahmen der Gebäudeenergiegewende eine große Rolle spielen, gehören Wärmepumpen, Photovoltaikanlagen, Solarthermieranlagen, Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen und grünes Gas bzw. Power-to-Gas-Anlagen. Die Relevanz der Thematik liegt im Ziel die Vorgaben aus dem Bundes-Klimaschutzgesetz zu erreichen begründet. Zum Erreichen dieser müssen Sanierungsraten und -tiefen gesteigert werden und deshalb so viele Hürden wie möglich, wozu auch Hemmnisse durch regulatorische Rahmenbedingungen gehören, beseitigt werden. Die Übersichten wurden durch Literaturrecherchen und die Auswertung von Befragungen erstellt. In den folgenden Abschnitten sind die wichtigsten Informationen zusammengetragen, eine Langfassung ist unter dem Titel „Regulatorische Rahmenbedingungen im Forschungsbereich Energiegewendebauen“ zu finden [139].

Die Regularien mit der größten Relevanz werden nachfolgend kurz aufgeführt. Zentrale Regelwerke wie das Gebäudeenergiegesetz (GEG) [140] legen energetische Mindeststandards für Neubauten und Bestandsbauten fest und werden durch mietrechtliche Bestimmungen aus dem Bürgerlichen Gesetzbuch (BGB) [141] ergänzt, die etwa die Umlage von Modernisierungskosten regeln. In Bezug auf Mietverhältnisse spielt auch das Kohlendioxidkostenaufteilungsgesetz (CO₂KostAufG) [142] eine Rolle. Förderprogramme wie die Bundesförderung für effiziente Gebäude (BEG) [143], das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) [144] und das Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz (KWKG) [145] unterstützen Maßnahmen durch finanzielle Anreize und günstige Kredite. Zusätzlich existieren spezifische Regelungen auf Landes- und Kommunalebene, welche weitere Anforderungen vorsehen. Dazu zählen z. B. die Landesbauordnungen, die es für jedes Bundesland gibt (Beispiel NRW: [146]). Diese Regelungen zielen darauf ab, die Energieeffizienz zu steigern, erneuerbare Energien zu fördern und die Klimaziele des Bundes-Klimaschutzgesetzes [147] zu erreichen. Neben der Umsetzung werden auch Beratungsleistungen zu den Themen energieeffizientes Bauen und Sanieren gefördert [148, 149]. Neben der klassischen Förderung durch Zuschüsse oder günstige Kredite gibt es weiterhin die Möglichkeit einen Teil der Kosten für die durchgeführten Maßnahmen steuerlich abzusetzen [150].

Für die verschiedenen Technologien zur regenerativen Energiegewinnung oder -bereitstellung wurden regulatorische Hemmnisse auf Basis einer Literaturrecherche gesammelt und ausgewertet. Bei Wärmepumpen (WP) ist die Genehmigung ein Punkt, der zu Herausforderungen führt. Das betrifft insbesondere Wärmepumpen mit Erdwärmesonden, bei denen die Trinkwassereinzugsgebieteverordnung [151] und das Wasserhaushaltsgesetz [152] eine Rolle wegen des Schutzes von Grundwasser und Böden spielen, und Flächenkollektoren [153]. Auch gibt es Einschränkungen bei der Kältemittelwahl, welche durch F-Gase-Verordnung [154] festgelegt sind. Beim Ausbau von Photovoltaikanlagen (PV-Anlagen) sind Herausforderungen durch landesspezifische Verordnungen, z. B. hinsichtlich der verpflichtenden Nutzung von Dachflächen [155] oder unterschiedliche Mindestabstände in den Landesbauordnungen gegeben, gegeben. Ähnlich beeinflusst ein fehlendes bundesweites Installateursverzeichnis den Ausbau, da Installateure sich für jedes Verteilnetz einzeln eintragen müssen [156, 157]. Bei der technischen Ausführung entstehen durch die Regulatorik Herausforderungen hinsichtlich der Anforderungen zum Brandschutz [158, 159] und der Zählerschränke [160]. Zuletzt können in Bezug auf PV-Anlagen in Mehrfamilienhäusern Hemmnisse bedingt durch Mieterstrom Regelungen genannt werden, wie sie im Energiewirtschaftsgesetz (EnWG) [161] festgelegt sind. Der Ausbau von Solarthermieranlagen wird hauptsächlich durch die Konkurrenz bei der Dachflächennutzung mit den PV-Anlagen hervorgerufen, welche meist die wirtschaftlichere Lösung darstellen, da die Solarthermieranlagen im Vergleich zu PV-Anlagen in der Regulatorik benachteiligt werden [162]. Das ist z. B. darauf zurückzuführen, dass es für Solarthermieranlagen keine Förderung gibt, welche mit der Förderung für PV-Strom durch das EEG vergleichbar ist. Bei Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen (KWK-Anlagen) stellen aufwändige Anträge und Verfahren bei der Planung, Inbetriebnahme und beim Betrieb eine Hürde dar [163]. Analog zu den PV-Anlagen existieren bei den KWK-Anlagen durch die Wahlfreiheit der Mietenden bzgl. des Stromlieferanten Hemmnisse [161]. Zusätzlich besteht bei KWK-Anlagen durch langwierige Planungs-

und Bauphasen eine Planungsunsicherheit, da Änderungen hinsichtlich der Förderungen, Gesetze und Verordnung oft während der Bauzeit erfolgen [164]. Bei grünem Gas und in Verbindung damit Power-to-Gas-Anlagen ist z. B. die Abrechnung eine Herausforderung, da der Einspeise- und Abrechnungsbrennwert durch die Mehrseiteneinspeisung oft mehr als die erlaubten 2 % voneinander abweichen [165]. Für die Power-to-Gas-Anlagen fällt außerdem die Abgabe für Letztverbraucher ab, was die Kosten-Bilanz verschlechtert [166, 167].

Um die durch die Regulatorik bestehenden Hemmnisse zu mindern, wurden Anpassungsvorschläge recherchiert und analysiert. Die wichtigsten Erkenntnisse werden nachfolgend wiedergegeben. Für Details sei auf die Veröffentlichung „Regulatorische Rahmenbedingungen im Forschungsbereich Energiewendebauen“ [139] hingewiesen. In Bezug auf die energetischen Mindestanforderungen im GEG werden Verschärfungen vorgeschlagen sowie zusätzlich die Einführung neuer Berechnungsmethoden und eine stärkere Berücksichtigung der CO₂-Emissionen [168, 169]. Auch die Verpflichtung von Eigentümer:Innen ein Gebäude auf einen energetischen Mindeststandard zu bringen wurde diskutiert. Dabei besteht jedoch die Gefahr, dass immer nur auf den gerade notwendigen Stand saniert wird, deshalb mehrfach saniert werden muss und der Aufwand und die Kosten für den mehrfachen Aufwand letztlich höher sind, als sie es gewesen wären, wenn direkt auf einen höheren Stand saniert worden wäre [170]. Um das Mieter:Innen-Vermieter:Innen-Dilemma zu entschärfen, wurden Vorschläge zur Anpassung des Mietrechts gemacht. Grundsätzlich sind hier drei Hebel zu nennen: Die Anpassung der Modernisierungumlage, eine Umstellung zu Teilwärmieten-Modellen und eine Anpassung der Mietspiegel. Bei den Teilwärmieten-Modellen, wird ein fixer Anteil der Nebenkosten für das Heizen in der Miete berücksichtigt und ein Anteil, je nach Modell, zusätzlich von den Mieter:Innen, Vermieter:Innen oder beiden getragen (bspw. [171]). Auf Seite der Förderlandschaft gibt es ebenfalls einige Vorschläge. Es wurde gefordert die Höhe der Fördersätze anzupassen. Um dabei eine Sozialverträglichkeit zu gewährleisten, könnten die Fördersätze z. B. nach Einkommensgrenzen gestaffelt sein [172]. Ebenso können Entlastungen durch Anpassung des steuerlichen Rahmens erzielt werden, indem eine Abhängigkeit zwischen der Grundsteuer und des Sanierungsstands geschaffen wird [173]. Um die Inanspruchnahme von Fördermitteln zu steigern, wurde eine Entbürokratisierung der Bewilligung vorgeschlagen [173].

Ein weiterer Punkt im Hinblick auf die Regulatorik war die Betrachtung von gebundenen Emissionen. Unter gebundenen Emissionen sind die Emissionen zu verstehen, die in Lebenszyklusphasen wie der Herstellung, dem Transport oder dem Recycling entstehen. Also Emissionen die zu Betriebsemissionen noch dazu kommen. Diese gebundenen Emissionen werden bisher in der Regulatorik nicht berücksichtigt. Die Berücksichtigung gebundener Emissionen spielt beispielsweise bei Neubauten eine große Rolle, wo durch die Wahl der Baustoffe auch die gebundenen Emissionen geringgehalten werden können. Indirekt wird das durch die QNG-Zertifizierung gefördert, ohne jedoch explizit die Emissionen zu betrachten [174]. Vorgeschlagen wurden in diesem Zusammenhang z. B. die verpflichtende Durchführung einer Ökobilanz oder die Anpassung der Bilanzierungsgrenze unter Einbezug aller Lebenszyklusphasen. [175]

Zur Analyse der Forschungslandschaft im Bereich der regulatorischen Hemmnisse beteiligte sich Modul II an der Expertenbefragung der Energiewendebauen-Projekte durch die gesamte Begleitforschung im Herbst 2022. Außerdem wurden Antworten der Projekte aus den Fragebögen im Jahr 2021 und 2023 ausgewertet. Projekte hatten im Fragebogen die Möglichkeit auszuwählen, ob in ihrer Arbeit Hemmnisse im regulatorischen, technischen, organisatorischen und wirtschaftlichen Bereich oder sonstige Hemmnisse aufgetreten sind und in diesen Fällen die Hemmnisse zu erläutern. Die Antworten auf die Fragebögen haben gezeigt, dass Hemmnisse innerhalb aller Bereiche existieren, die meisten jedoch dem Bereich der Regulatorik zuzuordnen sind. Abbildung 53 zeigt die Verteilung der genannten Hemmnisse innerhalb des Bereichs der Regulatorik.

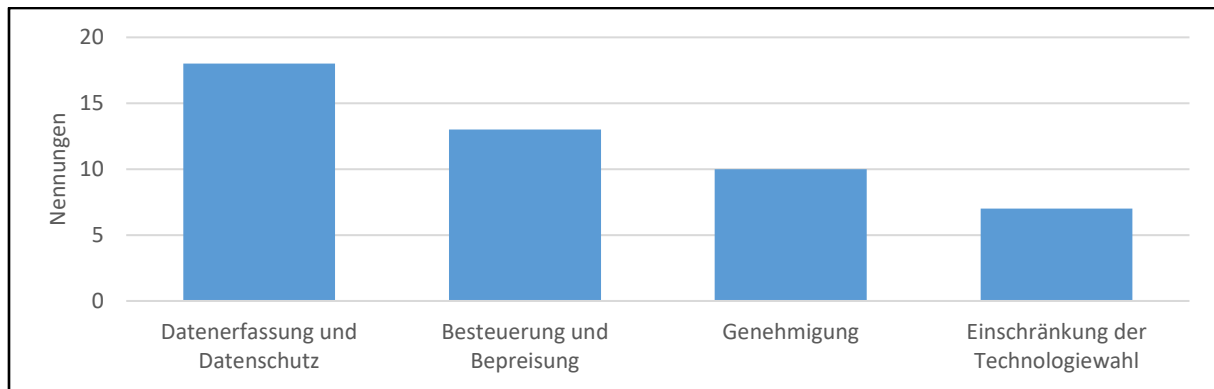


Abbildung 53: Häufigste Arten regulatorischer Hemmnisse in Forschungsprojekten.

Im Bereich der Datenerfassung und des Datenschutzes treten häufig Hürden bei der Erhebung und Nutzung von Daten, bedingt durch die Datenschutzverordnung, sowie fehlende Standardisierung und Schnittstellen auf. Im Hinblick auf die Besteuerung und Bepreisung werden fehlende oder nicht wirkungsvolle Anreize für den Einsatz von energieeffizienten Technologien, beispielsweise aktuelle Mieterstromkonzepte und das Fehlen flexibler Strompreise als Anreiz für netzdienliches Verhalten, genannt. Genehmigungsverfahren sind laut den Projekten zu bürokratisch, genauso wie die Zulassung neuer Technologien. Außerdem genannt wurde eine fehlende Berücksichtigung von neuen Technologien und eine fehlende Anerkennung von in der Forschung bewährten Bilanzierungswerkzeugen.

Zusammenfassend kann hinsichtlich der Befragungsergebnisse festgehalten werden, dass die Auswirkungen regulatorischer Rahmenbedingungen bei der Durchführung fast jeden Projekts eine Rolle gespielt haben, obwohl sie in den wenigsten Projekten explizit betrachtet wurden. In Verbindung mit der hohen Anzahl zu beachtender regulatorischer Rahmenbedingungen gibt es Unsicherheiten bzgl. der Anwendung auf oder der Gültigkeit für manche Technologien und Konzepte. Im Bereich des Wärmeschutzes, der Berücksichtigung von Flexibilitätsoptionen sowie der Anrechenbarkeit lokal erzeugter, regenerativer Energien gibt es laut den Befragten einen wesentlichen Bedarf die regulatorischen Rahmenbedingungen anzupassen, um damit die Durchführung von Projekten zu vereinfachen und beschleunigen. Diese Vorteile könnten im Nachhinein auch dazu beitragen, dass Projektideen in der Breite angewendet werden können.

Um eine modellbasierte Betrachtung der regulatorischen Rahmenbedingungen vornehmen zu können, wurde ein Mixed-Integer Linear Programming (MILP) Optimierungsmodell aufgebaut, welches die annualisierten Kosten der energetischen Modernisierungsmaßnahmen eines Gebäudeenergiesystems als Zielfunktion minimiert. Zur Spiegelung und Diskussion der Ergebnisse sowie zum Transfer in die Politik fanden zwei Treffen mit dem BMWK-Referat „Förderung Gebäudeenergie“ statt.

Dem Modell liegen verschiedene Rahmenannahmen hinsichtlich ökonomischer Parameter, wie bspw. Energie- und Anlagenpreise, technische Daten, wie bspw. Anlageneffizienzen, sowie Wetterdaten und Bedarfsprofile von Trinkwarmwasser und Strom zu Grunde. Um im gleichen Zug den Einfluss der Regulatorik zu berücksichtigen, wurden im Modell zusätzlich Förderschemata und gesetzliche Mindestanforderungen hinterlegt. Modernisierungen im Modell können sowohl die Anlagentechnik als auch bautechnische Maßnahmen betreffen. Hinsichtlich der regulatorischen Rahmenbedingungen sind Anforderungen aus dem GEG, der BEG, des KWKG und des EEG im Modell hinterlegt. Diese beeinflussen die Entscheidungen des MILP, indem sie entweder auf die Kosten und damit die Wirtschaftlichkeit einer Maßnahme oder im Fall von Mindestanforderungen, z. B. bzgl. des Mindestwärmeschutzes, den Lösungsraum einschränken und gesetzlich verbotene Lösungen ausschließen. Das Modell ermöglicht einen Vergleich zwischen dem optimierten Energiesystem mit den regulatorischen Einflüssen bzw. ohne diese. So konnte analysiert werden, welche Förderungen abgerufen werden und welche Unterschiede es hinsichtlich der resultierenden Kosten und Emissionen gibt. Die Auswertung des Modells

erfolgte anhand von Typgebäuden für den deutschen Gebäudebestand aus der TABULA-Datenbank [176]. Das Modell ist wie in Abbildung 54 dargestellt aufgebaut.

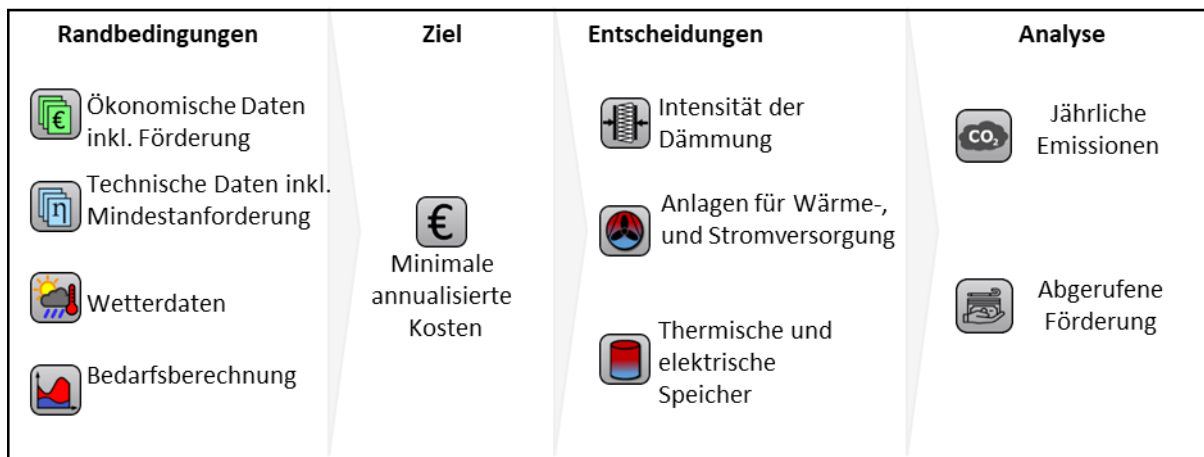


Abbildung 54: Aufbau des Berechnungsmodells.

Die wichtigsten Ergebnisse werden am Beispiel eines typischen Gebäudes hier kurz zusammengefasst (vgl. Abbildung 55). Die Grundlage bildet ein Einfamilienhaus mit einer Wohnfläche von 120 m² der Baualtersklasse 1958 bis 1968, einem Vier-Personen-Haushalt und einer Wärmeversorgung über einen Gaskessel. Fall 1 ist der unsanierte Fall, während bei den Fällen 2 und 3 Sanierungen durchgeführt wurden und im Fall 3 die BEG-Förderung, das EEG sowie das KWKG zusätzlich hinterlegt sind. Den Ergebnissen liegen Strom- und Gaspreise von 31 bzw. 6 ct/kWh zu Grunde. Ohne Förderung wird unter diesen Bedingungen nur eine geringe Emissionseinsparung, durch Dämmmaßnahmen an der Kellerdecke, erzielt. Unter Berücksichtigung der Förderung wählt der Optimierer hingegen zusätzliche Dämmmaßnahmen, was in einer rein strombasierten Wärmebereitstellung durch eine Wärmepumpe und dadurch großen Emissionseinsparungen resultiert.

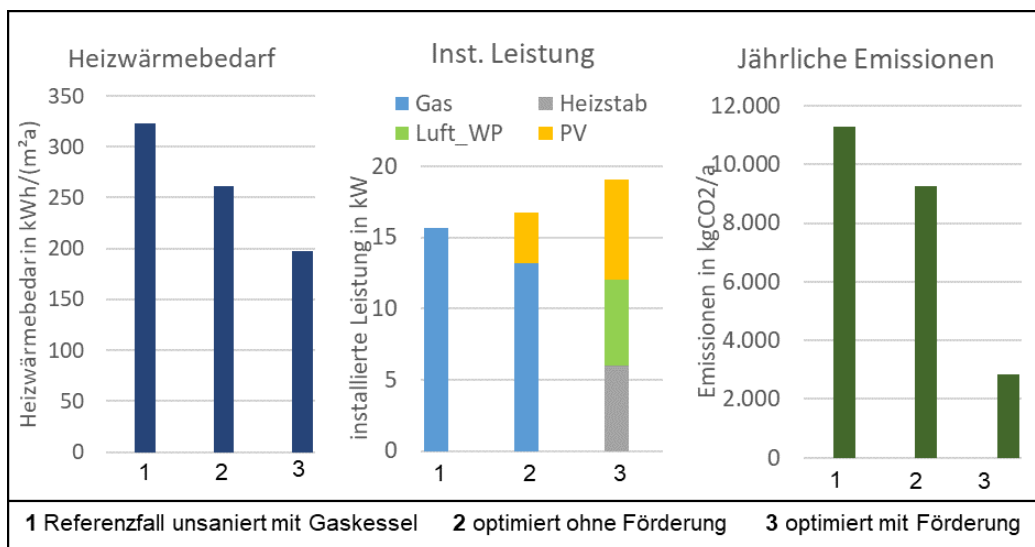


Abbildung 55: Ergebnisse am Fallbeispiel eines Einfamilienhauses

In einer Parameterstudie wurde zusätzlich der Einfluss variierender Energiepreise aufgezeigt. Als Grundlage wurden zwei Einfamilienhäuser mit 120 m² Wohnfläche und je einem vier Personen Haushalt gewählt. Sie unterscheiden sich hinsichtlich der Baualtersklasse und damit hinsichtlich des Dämmstandards im unsanierten Fall (Baualtersklasse 1984 – 1994 vs. 1958 – 1968). Durch die Variation der Preise konnten die Kippunkte aufgezeigt werden. Für den WP-Stromtarif wurde angenommen, dass

dieser 80 % des normalen Strompreises beträgt. Fällt das Strom- zu Gaspreisverhältnis auf unter 3,5 entscheidet die Optimierung zu Gunsten der Wärmepumpe (vgl. Abbildung 56).

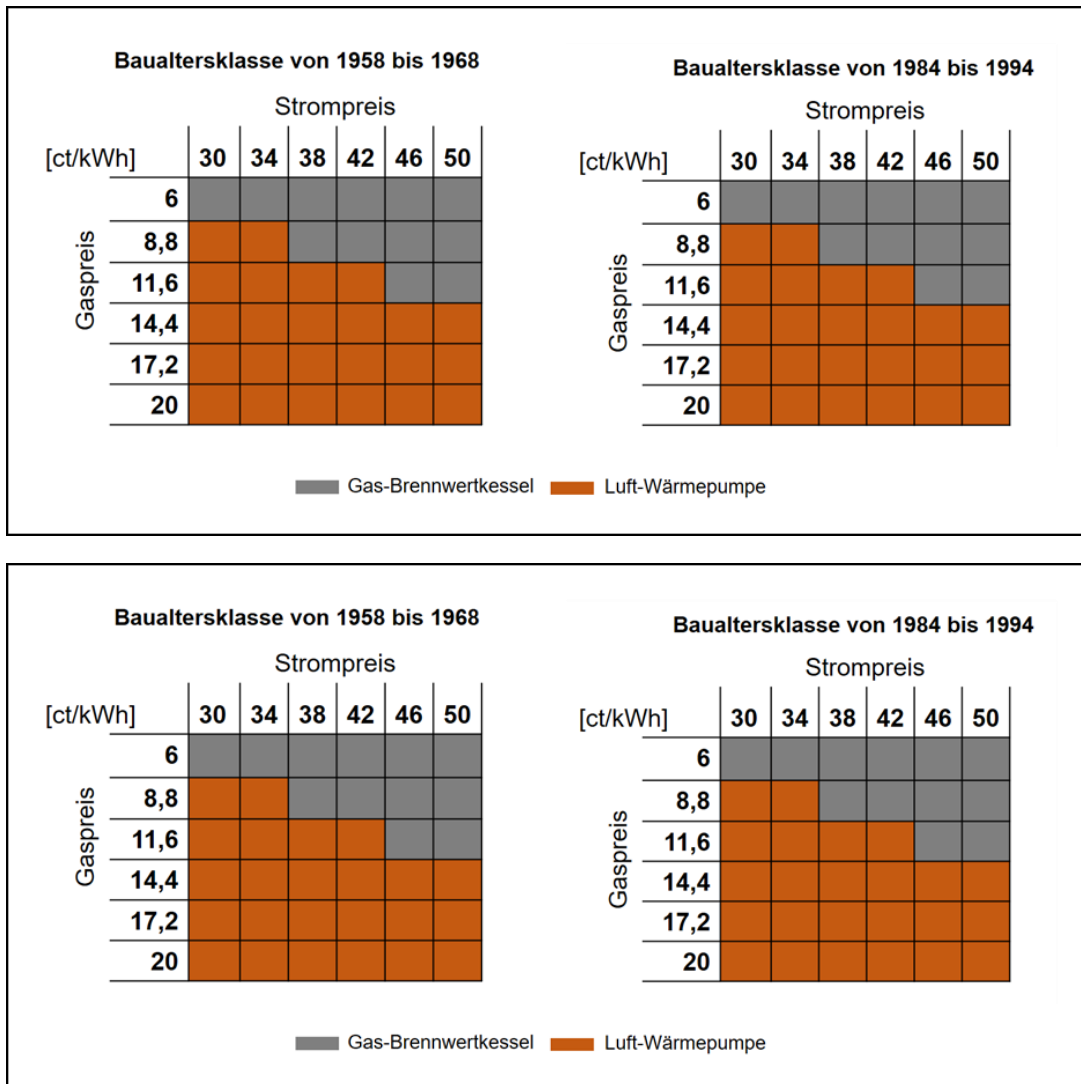


Abbildung 56: Technikwahl im typischen Einfamilienhaus unter verschiedenen Energiepreisszenarien.

Neben den Energiepreisen wird die Wirtschaftlichkeit eines Energiesystems maßgeblich von Förderungen beeinflusst. Sie haben eine große Lenkungswirkung hinsichtlich der Technologiewahl. Aus diesem Grund wurde eine weitere Parameterstudie mit variierenden Fördersätzen für Komponenten der Anlagentechnik und Gebäudehülle durchgeführt. Die Förderung wird in Form eines Zuschusses zu den Investitionen der jeweiligen Komponente gegeben. Unter der Annahme des Energiepreisniveaus vor der Energiekrise 2022 muss die Förderung der Wärmepumpe bei 50 % liegen, um gegenüber dem Gaskessel einen wirtschaftlichen Vorteil zu bieten. Basierend auf dem Energiepreisniveau von 2022 (Gaspreis: 14 ct/kWh, Strompreis: 36 ct/kWh) ist das Wärmepumpen-System auch ohne Förderung wirtschaftlich (vgl. Abbildung 57).

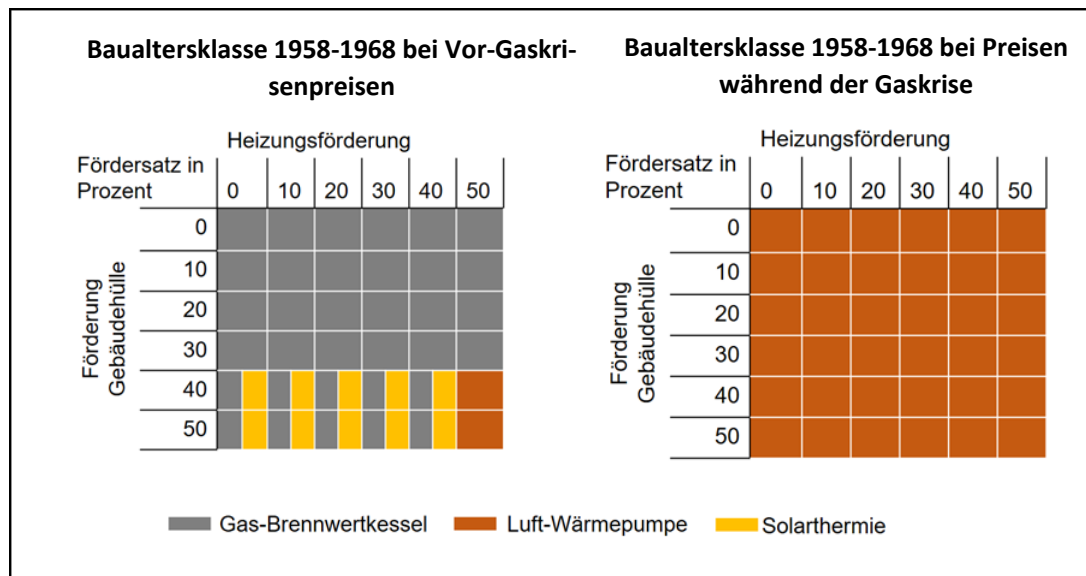


Abbildung 57: Technikwahl im typischen Einfamilienhaus unter verschiedenen Fördersätzen.

Mit Hilfe der Optimierungsergebnisse sollen Förderraten festgelegt werden. Ziel des Modells ist es, aus Sicht der Fördermittelgeber:Innen Förderraten festzulegen, mit denen Gebäudeeigentümer:Innen überzeugt werden, das Gebäude zu modernisieren, um auf Bestandsebene Emissionsziele mit möglichst geringen aufgewendeten Förderungen zu erreichen. Das Schema ist in Abbildung 58 dargestellt. Das vorgestellte Modell wird dafür angepasst, sodass nur noch diskrete Kombinationen aus Komponenten der Anlagentechnik und Gebäudeshülle gewählt werden können. Diese stehen in Form einer Liste als Input für das zweite Optimierungsmodell zur Verfügung. Innerhalb des zweiten Modells werden aus der Liste Kombinationen ausgewählt und für diese Maßnahmen(-Pakete) Förderraten festgelegt, um die Emissionsziele kostengünstig zu erreichen. Aus den Entscheidungen der Gebäudeeigentümer:Innen resultieren jährliche, betriebsbedingte Emissionen sowie Kosten für Förderungen für die Fördermittelgeber:Innen. Die Fördermittelgeber:Innen auf oberer Modellebene haben wiederum das Ziel, festgelegte Emissionsziele zu erreichen und dabei möglichst geringe Förderungen auszuführen. Nebenbedingungen garantieren, dass für die Gebäudeeigentümer:Innen keine günstigere Möglichkeit existiert. Die Ergebnisse wurden im Rahmen eines Konferenzpapiers [177] sowie eines journal-articles [178] veröffentlicht.

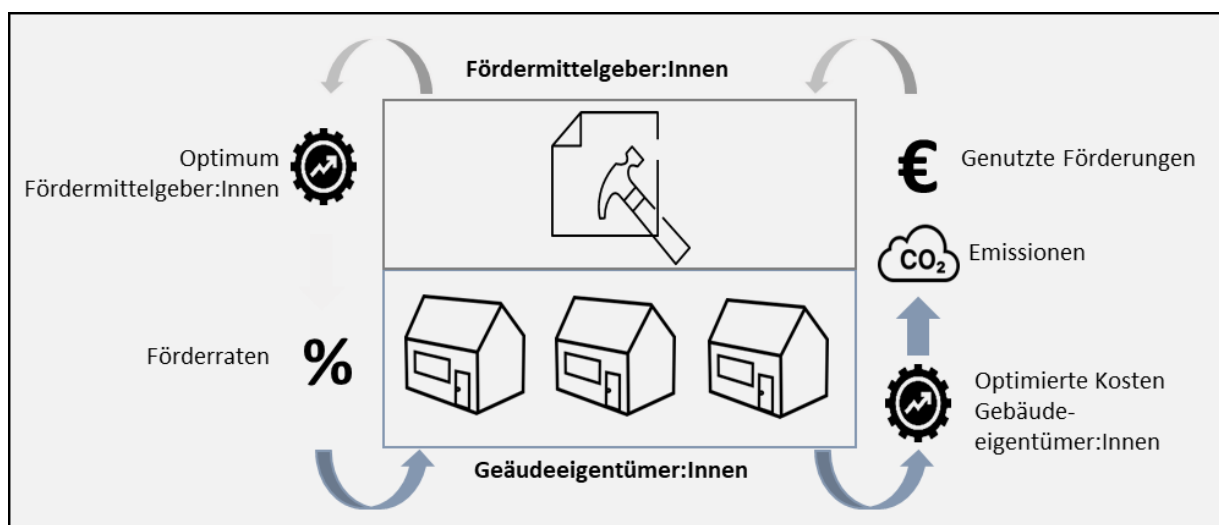


Abbildung 58: Schematische Struktur des zweistufigen Optimierungsmodells zur Ermittlung optimierter Förderraten.

Im Rahmen eines Fachbeitrags im Magazin „Moderne Gebäudetechnik“ wurden die Auswirkungen verschiedener Energiepreise und Fördersätze sowie die Anforderung eines Anteils von 65 % erneuerbarer Energien bei der Gebäudebeheizung evaluiert [13]. Abbildung 59 zeigt exemplarisch Ergebnisse für die Wahl eines kostenoptimierten Energiesystems bei Berücksichtigung verschiedener Fördersätze sowie unterschiedlicher Baualtersklassen. Die Fördersätze wurden zwischen 0 und 60 % der Investitionen für die Heizungstechnologien Wärmepumpe und Pelletkessel sowie Sanierungsmaßnahmen an der Gebäudehülle variiert. Für Strom wurde ein Preis von 34,96 ct/kWh, für Wärmepumpenstrom ein Preis von 28 ct/kWh und für Gas ein Preis von 9,34 ct/kWh angesetzt. Die Ergebnisse zeigen, dass eine Förderung von Wärmepumpen unter diesen Bedingungen notwendig ist, damit sie sich gegen die anderen Technologien, neuer Pelletkessel oder Gaskessel, durchsetzen kann. Je mehr Dämmmaßnahmen am Gebäude gefördert werden, umso mehr wird auch die Wärmepumpe gewählt, da diese in gut gedämmten Gebäuden die wirtschaftlichste Alternative zur Wärmebereitstellung ist.

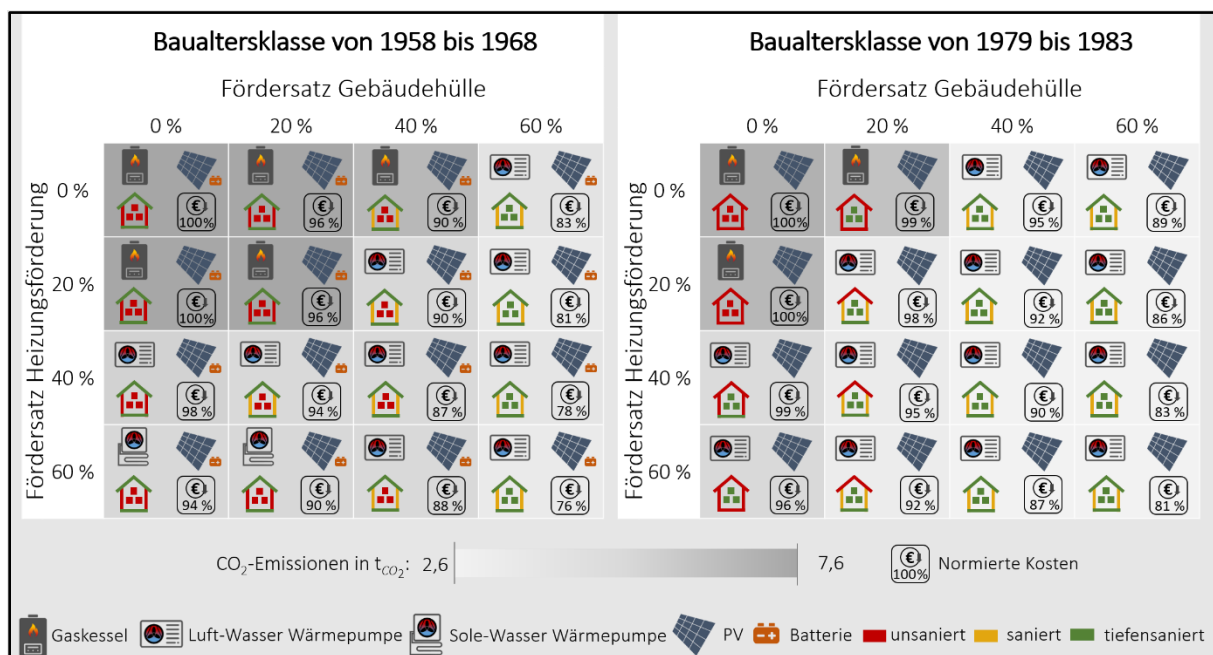


Abbildung 59: Wirtschaftliche Technologiewahl hinsichtlich totaler Kosten in zwei typischen Einfamilienhäusern unterschiedlicher Dämmstandards unter veränderlichen Fördersätzen. Die normierten Kosten beziehen sich jeweils auf den Referenzfall ohne Förderung.

In AP 4.1 wurde die besondere Relevanz von Modernisierungen in Mehrfamilienhäusern gezeigt, welche sich durch fehlende Anreize wegen der Trennung von Eigentümer:Innen und Nutzer:Innen ergibt. Vermieter:Innen müssen Investitionen tätigen, während Mieter:Innen hauptsächlich von Einsparungen bei den Energiekosten profitieren. Es resultiert das sogenannte „Mieter:Innen-Vermieter:Innen-Dilemma“, welches den mangelnden Modernisierungsanreiz von Vermieter:Innen in Mietverhältnissen beschreibt. Die vorhandenen Werkzeuge, wie die Modernisierungsumlage bzw. die kostenbasierte Kaltmietenerhöhung, bieten für Vermieter:Innen bzw. Mieter:Innen keine befriedigende Lösung. Außerdem bleibt eine Lenkungswirkung hinsichtlich verringerter Emissionen beim Gebäudebetrieb aus. Zur Überwindung des Dilemmas sieht das Mietrecht verschiedene Stellhebel vor, von denen die energetische Differenzierung in Mietspiegeln, eine CO₂-Preisverteilung gemäß CO₂-Kostenaufteilungsge-
 setz und Mieterstromkonzepte in einem Impulspapier betrachtet wurden [179]. Ziel des Papiers war die modellbasierte Untersuchung der genannten Lösungsansätze des Mieter:Innen-Vermieter:Innen-Dilemmas hinsichtlich der finanziellen Belastung von Mieter:Innen und Vermieter:Innen sowie der Lenkungswirkung zur Emissionseinsparung. In Abbildung 60 ist die Technologiewahl in einem Mehrfamilienhaus für maximale Erlöse aus Sicht der Vermieter:Innen dargestellt. Im Fall „Mieter-Vermieter“ werden die Regelungen der Modernisierungsumlage sowie der Mietpreisbremse berücksichtigt. Im Fall

„Kombination“ werden zusätzlich die Regelungen der CO₂-Preisverteilung, der Mieterstromgesetze sowie der energetischen Differenzierung von Mietspiegeln nach Hamburger Beispiel berücksichtigt. Zusätzlich werden jeweils zwei Preisszenarien betrachtet (S1: Gas 20 ct/kWh, Strom 40 ct/kWh, CO₂: 3 ct/kg; S2: Gas 12,5 ct/kWh, Strom 32,7 ct/kWh, CO₂: 10,5 ct/kg).

Die Ergebnisse zeigen, dass durch die Modernisierungsumlage allein kein ausreichender Anreiz für Modernisierungen besteht. Die Mieterstromregelungen bewirken hingegen einen Anreiz zur Investition in eine PV-Anlage. Auch die CO₂-Preisverteilung und die energetische Differenzierung von Mietspiegeln bewirken, dass eine teilweise Elektrifizierung des Energiesystems wirtschaftlich wird. Diese Maßnahmen führen zu großen Emissionseinsparungen von etwa 45 % in beiden Preisszenarien. Maßnahmen an der Gebäudehülle werden jedoch nicht durchgeführt. Die Auswertungen zeigen eine Lenkungswirkung der betrachteten politischen Maßnahmen zur Emissionseinsparung, demonstrieren aber auch, dass keine ausreichenden Anreize zur tiefgreifenden Modernisierung des Gebäudes und insbesondere der Gebäudehülle vorliegen.

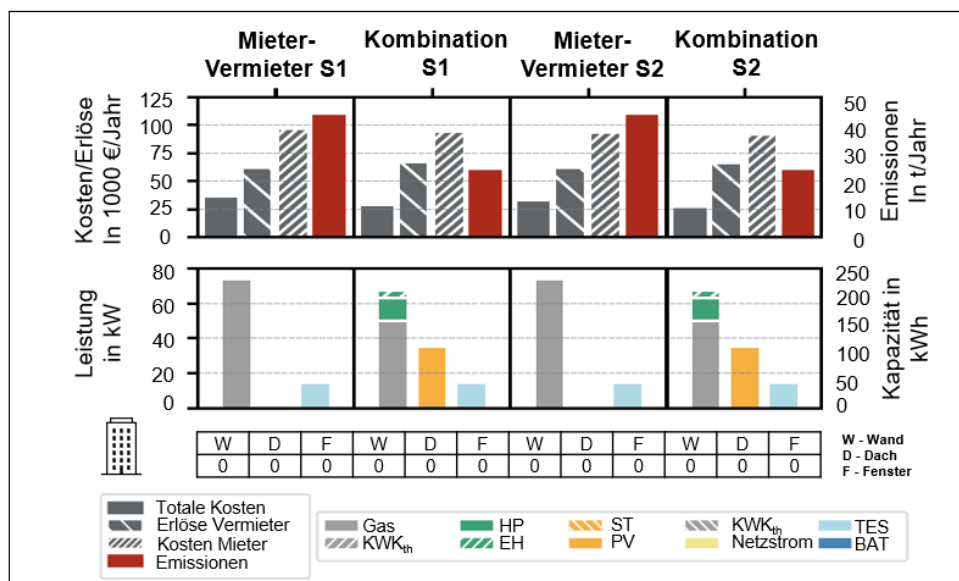


Abbildung 60: Vergleich der Technologiewahl sowie der resultierenden Kosten und Emissionen im vermieteten Mehrfamilienhaus mit und ohne neu eingeführte Elemente des Mietrechts (CO₂-Preisverteilung, Mieterstrom, energetische Differenzierung von Mietspiegeln) in zwei Preisszenarien.

Die durchgeführten Parameteranalysen zeigen, dass eine flächendeckende Einführung von Mietspiegeln, welche energetische Kriterien berücksichtigen, in Kombination mit einer Wärmepumpenförderung Anreize zur Modernisierung vermieteter Mehrfamilienhäuser schafft. Die Definition der Klassengrenzen der Mietspiegel in Bezug auf den Endenergiebedarf zeigte sich hierbei als wesentlicher Einflussparameter, welcher die Tiefe der Modernisierungsmaßnahmen lenken kann. Tiefere Einblicke in das Thema gibt die Veröffentlichung zum Mieter:Innen-Vermieter:Innen-Dilemma [15].

4 Zusammenfassung

Das Modul „Gebäude“ der wissenschaftlichen Begleitforschung im Rahmen der Forschungsinitiative Energiewendebauen hatte das Ziel, wissenschaftliche Erkenntnisse und praktische Erfahrungen aus einer Vielzahl geförderter Demonstrationsprojekte systematisch zu erfassen, vergleichend auszuwerten und zielgerichtet aufzubereiten. Im Mittelpunkt standen dabei sowohl die Analyse laufender Projekte als auch die Entwicklung von Werkzeugen, Leitfäden und Modellen zur Unterstützung der Forschung und Praxis. Ein besonderer Fokus lag auf dem Wissenstransfer sowie der Ableitung konkreter Handlungsempfehlungen zur Umsetzung der Energiewende im Gebäudesektor.

Zur Unterstützung der Forschungscommunity wurden verschiedene Werkzeuge erarbeitet. Dazu gehören Indikatorensteckbriefe zur Bewertung energiebezogener Kenngrößen, ein Glossar zur Vereinheitlichung zentraler Fachbegriffe sowie eine Definitionsmatrix zur Netzdienlichkeit, die verschiedene Eigenschaften und Wirkungen netzdienlicher Gebäudekonzepte strukturiert darstellt. Ergänzend wurde ein Verfahren zur Auswertung von Lastprofilen aus der Monitoringdatenbank entwickelt und im Monitoringleitfaden dokumentiert. Auch praktische Aspekte wie die Verfügbarkeit von Handwerkskapazitäten wurden berücksichtigt: Expert:Inneninterviews mit 90 Betrieben lieferten belastbare Daten zur Planbarkeit von Modernisierungsmaßnahmen, die in Optimierungsmodelle einfließen. Da die Datenlage in vielen Abschlussberichten uneinheitlich war und direkte Quervergleiche erschwerte, wurden in enger Abstimmung mit dem Projektträger (PtJ) methodische Grundlagen geschaffen, um Energieeinsparungen und Emissionsminderungen systematisch zu erfassen. Daraus resultierten anwendungstaugliche Leitfäden für sechs unterschiedliche Projekttypen, die in Workshops und Interviews mit Projektbeteiligten weiterentwickelt wurden. Sie sollen künftig die Erfassung und Darstellung von Einsparpotenzialen vereinheitlichen und vergleichbare Auswertungen ermöglichen.

Ein zentraler Bestandteil des Projekts war die Durchführung themenspezifischer Querauswertungen über verschiedene Projekte hinweg. So wurde der Einfluss sozioökonomischer Faktoren und des Nutzer:Innenverhaltens auf Sanierungsentscheidungen analysiert. Innovative Technologien und smarte Anwendungen wurden systematisch nach Einsatzgebieten und Optimierungspotenzialen ausgewertet. Die Bewertung smarter Gebäude erfolgte unter anderem mit der EU-SRI-Methode an sieben Demonstrationsgebäuden, wodurch praxisnahe Empfehlungen zur Erreichung hoher Intelligenzwerte abgeleitet werden konnten. Weitere Querschnittsanalysen befassten sich mit kosteneffizienten Lösungen, regulatorischen Rahmenbedingungen sowie mit Flexibilitäts- und Speicheroptionen für netzdienliche Gebäudeenergiesysteme. Auch spezielle Forschungsbereiche wie Lüftungstechnik und Wärmepumpen wurden analysiert, um bestehende Forschungsschwerpunkte und offene Fragestellungen sichtbar zu machen. Die gesammelten Lessons Learned aus den Projekten wurden aufbereitet, um zukünftige Vorhaben von bereits gewonnenen Erkenntnissen profitieren zu lassen.

Zur vertieften Bewertung energetischer Sanierungsmaßnahmen wurden im Projektverlauf modellbasierte Analysen durchgeführt. Diese umfassten sowohl die Bewertung typischer Gebäudesanierungskonzepte als auch die Untersuchung regulatorischer Einflussfaktoren wie Förderprogramme, gesetzliche Anforderungen oder das sogenannte Mieter:Innen-Vermieter:Innen-Dilemma. Die Ergebnisse dieser Analysen wurden in wissenschaftlichen Fachzeitschriften und praxisnahen Magazinen veröffentlicht und teils in enger Abstimmung mit dem Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) diskutiert. Ein weiterentwickeltes Optimierungsmodell ermöglichte zudem die quantitative Bewertung unterschiedlicher netzdienlicher Gebäudekonzepte hinsichtlich Wirtschaftlichkeit, Umweltwirkung und Nutzer:Innenzufriedenheit. Auf Basis eines agentenbasierten Modells wurden darüber hinaus drei Zukunftsszenarien zum Energiebedarf des deutschen Gebäudebestands bis 2050 erstellt. Die Ergebnisse dieser Szenarienanalysen wurden online in einem interaktiven Webtool visualisiert, das eine einfache Zugänglichkeit und breite Nutzung erlaubt.

Ein weiterer wichtiger Bestandteil des Projekts war der zielgerichtete Wissenstransfer. Die Forschungsergebnisse wurden über Veranstaltungen wie Projekt- und Fokustreffen, Fachpublikationen, Tagungsbeiträge sowie die Projektwebseite einer breiten Öffentlichkeit zugänglich gemacht. Das entwickelte Kommunikationskonzept ermöglichte eine adressatengerechte Ansprache verschiedener Zielgruppen aus Forschung, Praxis und Politik. Darüber hinaus wurden die Ergebnisse in die Lehre eingebunden – sowohl an der RWTH Aachen University als auch über das Fraunhofer IBP an der Universität Stuttgart. Auch Abschlussarbeiten und Promotionen konnten auf den erarbeiteten Inhalten aufbauen und diese weiterentwickeln.

Insgesamt hat das Modul „Gebäude“ der wissenschaftlichen Begleitforschung einen umfassenden Beitrag zur Vernetzung, Standardisierung und Weiterentwicklung der Forschungslandschaft im Bereich energieeffizienter Gebäude geleistet. Die systematischen Analysen, die entwickelten Werkzeuge und Modelle sowie der intensive Wissenstransfer liefern Grundlagen für die Planung, Umsetzung und Bewertung zukünftiger Projekte zur Gebäudewende.

5 Literaturverzeichnis

- [1] AdV, „AdV. Katalog der tatsächlichen Nutzungsarten im Liegenschaftskataster und ihrer Begriffsbestimmungen (AdV-Nutzungsartenkatalog),“ 2024. [Online]. Available: www.adv-online.de. [Zugriff am 02.09.2024].
- [2] European Commission, „Calculation sheet Smart Readiness Indicator for Buildings, Version 4.2 (SRI3_calculation-sheet_v4_4.xlsx)“.
- [3] L. Lyslow und H. Erhorn-Kluttig, „Übersicht von gebäude- und technologiespezifischen Indikatoren für den energieeffizienten Gebäudebereich in Form von Listen und Steckbriefen,“ Wissenschaftliche Begleitforschung, Stuttgart, 2025.
- [4] Wissenschaftliche Begleitforschung Energiewende Bauen, Messleitfaden für Demonstrationsvorhaben im Bereich "Energie in Gebäuden und Quartieren", Saarbrücken: Hrsg.: IZES GmbH, 2024.
- [5] J. Richarz, N. F. J. Zurke, J. Imberg, T. Datsko und D. H. & D. Müller, „Realization times of energetic modernization measures for buildings based on interviews with craftworkers,“ *Nature Scientific Data*, 20 Juli 2023.
- [6] Y. Zhang, N. Fuchs, L. Maier und D. Müller, „Netzdienliche Gebäudekonzepte in den Forschungsprojekten der Förderinitiative Energiewendebauen,“ 2024.
- [7] J. Preuss und H. Erhorn-Kluttig, „Innovative Technologien im Gebäudebereich der Forschungsinitiative ENERGIEWENDEBAUEN,“ 2023.
- [8] J. Preuss, „Zusammenstellung von kostengünstigen Lösungen im Gebäudebereich der Forschungsinitiative ENERGIEWENDEBAUEN,“ Wissenschaftliche Begleitforschung Energiewendebauen, Stuttgart, 2024.
- [9] J. Kaiser, H. Erhorn-Kluttig, Y. Zhang, L. Maier und D. Müller, „Was heißt smart im Gebäude?,“ *Gebäude Energieberater*, 11 März 2024.
- [10] L. Lyslow und H. Erhorn-Kluttig, „Analyse und Bewertung von Demonstrationsgebäuden hinsichtlich Smart Readiness anhand der Anwendung der EU-Bewertungsmethode des Smart Readiness Indicators (SRI),“ Wissenschaftliche Begleitung, Stuttgart, 2022.
- [11] „Regulatorische Rahmenbedingungen im Forschungsbereich Energiewendebauen,“ Energiewendebauen Modul 2: Gebäude, Dezember 2024.
- [12] J. Richarz, D. Hering und D. Müller, „Potentiale vorausdenken: Langfristige Modernisierungsplanung (Teil 1),“ *Gebäudeenergieberater*, 12 Oktober 2022.
- [13] J. Richarz, D. Hering und D. Müller, „Potentiale vorausdenken: Langfristige Modernisierungsplanung (Teil 2),“ *Gebäudeenergieberater*, 24 November 2022.
- [14] N. Fuchs, D. Hering und D. Müller, „Politische Maßnahmen und ihr Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit von Gebäudeenergiesystemen, erschienen in *Moderne Gebäudetechnik*,“ *Moderne Gebäudetechnik*, Nr. 9/2023.

- [15] N. Fuchs, J. Baumgärtner, L. Maier und D. Müller, „Politische Maßnahmen und ihr Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit von Gebäudeenergiesystemen,“ *Moderne Gebäudetechnik*, 11 September 2023.
- [16] L. Kühn, N. Fuchs, L. Braun, M. L. und D. Müller, „Landlord–Tenant Dilemma: How Does the Conflict Affect the Design of Building Energy Systems?,“ *energies*, 2024.
- [17] Y. Zhang, T. Wiederhöft, T. Schreiber und D. Müller, „Optimization of a grid-interactive building energy system considering user satisfaction,“ in *Proceedings of BauSim Conference 2022: 9th Conference of IBPSA-Germany and Austria*, Weimar, 2022.
- [18] Y. Zhang, S. Rolfes, N. Fuchs, L. Maier und D. Müller, „Optimierte netzdienliche Energiesysteme für typische Wohn- und Nichtwohngebäude in Deutschland,“ November 2024. [Online]. Available: https://www.forschungsnetzwerke-energie.de/lw_resource/datapool/systemfiles/agent/fnepublications/89308efd-b158-11ef-bbeb-901b0ed15ea9/live/document/Optimierte_netzdienliche_Geb%C3%A4udeenergiesysteme.pdf. [Zugriff am Dezember 2024].
- [19] Statistische Ämter des Bundes und der Länder, „Zensus 2022,“ [Online]. Available: https://www.zensus2022.de/DE/Ergebnisse-des-Zensus/_inhalt.html. [Zugriff am 2024].
- [20] Kompetenzzentrum kommunale Wärmeplanung, „Bundesrecht: Wärmeplanungsgesetz mit Leitfaden und Technikkatalog,“ [Online]. Available: <https://www.kww-halle.de/praxis-kommunale-waermewende/bundesgesetz-zur-waermeplanung>. [Zugriff am 2024].
- [21] Projektträger Jülich, „Publikationen der Forschungsnetzwerke Energie,“ [Online]. Available: <https://www.forschungsnetzwerke-energie.de/veroeffentlichungen/publikationen>. [Zugriff am 2024].
- [22] M. Dotzauer und I. Hartmann, „Resümeeepapier - BMWK-Forschungsnetzwerk Bioenergie,“ Februar 2023. [Online]. Available: https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=https://energetische-biomassenutzung.de/sites/default/files/2024-02/Resumee_Heizung_ohne_Erdgas_DBFZ-Feb2023_0.pdf&ved=2ahUKewja3sjsKqLAXVo0QIHVcxOFoQFnoECBUQAQ&usg=AOvVaw0RHnQXd2sz463P8k.
- [23] *Akteure und Netzwerke im Forschungsbereich Energiewendebauen*, 2021.
- [24] I. Brunzema, A. Gundlach und E. Dütschke, „Wer baut die Energiewende? Akteure und Netzwerke im Forschungsbereich Energiewendebauen,“ Dezember 2021. [Online]. Available: https://www.energiewendebauen.de/lw_resource/datapool/systemfiles/agent/ewbpublications/D67B140FD0130459E0537E695E86157B/live/document/Ergebnisszusammenfassung_Akteursanalyse_und_Fokustreffen.pdf.
- [25] „Nutzenverhalten - Einflussfaktoren und Einflussnahme auf die Gebäudeperformance,“ 2024.
- [26] Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz, „Energieforschung - Informationsseite zur Projektförderung des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz,“ Digital, 2025.

-
- [27] L. Lyslow, H. Erhorn-Kluttig, J. Schrade, J. Preuss, M. Illner, J. Kaiser, H. Brugger, E. Dütschke, B. Müller, A. Gundlach, Y. Zhang, N. Fuchs und S. Welter, „Glossar für Begrifflichkeiten aus dem Bereich der energieeffizienten Gebäude - Erweiterung,“ 2024.
- [28] Wissenschaftliche Begleitforschung Energiewendebauen, „Fragebogen der Wissenschaftlichen Begleitforschung,“ Berlin, 2021.
- [29] H. Erhorn-Kluttig, „Leitfaden: Ermittlung von Einspareffekten an Energie und klimaschädlichen Emissionen bei der Umsetzung von Forschungsvorhaben und deren Sanierung. Projekttyp: Demonstrationsgebäude bzw. Konzept-/Planungsphase als Vorbereitung zu einem Umsetzungsprojekt,“ Wissenschaftliche Begleitforschung Energiewendebauen, Stuttgart, 2024.
- [30] H. Erhorn-Kluttig, „Leitfaden: Ermittlung von Einspareffekten an Energie und klimaschädlichen Emissionen bei der Umsetzung der Forschungsvorhaben und deren Skalierung. Projekttyp: Studien und Konzeptentwicklung ohne Gebäudeumsetzung,“ Wissenschaftliche Begleitforschung Energiewendebauen, Stuttgart, 2024.
- [31] H. Erhorn-Kluttig, „Leitfaden: Ermittlung von Einspareffekten an Energie und klimaschädlichen Emissionen bei der Umsetzung der Forschungsvorhaben und deren Skalierung. Projekttyp: Konzeptentwicklung inkl. Feldmessung,“ Wissenschaftliche Begleitforschung Energiewendebauen, Stuttgart, 2024.
- [32] H. Erhorn-Kluttig, „Leitfaden: Ermittlung von Einspareffekten an Energie und klimaschädlichen Emissionen bei der Umsetzung der Forschungsvorhaben und deren Skalierung. Projekttyp: Technologieentwicklung und -einsatz,“ Wissenschaftliche Begleitforschung Energiewendebauen, Stuttgart, 2024.
- [33] H. Erhorn-Kluttig, „Leitfaden: Ermittlung von Einspareffekten an Energie und klimaschädlichen Emissionen bei der Umsetzung der Forschungsvorhaben und deren Skalierung. Projekttyp: Betriebsoptimierung,“ Wissenschaftliche Begleitforschung Energiewendebauen, Stuttgart, 2024.
- [34] H. Erhorn-Kluttig, „Leitfaden: Ermittlung von Einspareffekten an Energie und klimaschädlichen Emissionen bei der Umsetzung der Forschungsvorhaben und deren Skalierung. Projekttyp: Herstellungsprozesse,“ Wissenschaftliche Begleitforschung Energiewendebauen, Stuttgart, 2024.
- [35] H. Erhorn-Kluttig, „Erarbeitung von Leitfäden zur Ermittlung von Einspareffekten an Energie und klimaschädlichen Emissionen bei der Umsetzung von Forschungsvorhaben und deren Skalierung,“ Stuttgart, 2024.
- [36] J. Richarz, S. Henn, T. Osterhage und D. Müller, „Optimal scheduling of modernization measures for typical non-residential buildings,“ *Energy*, 2022.
- [37] ASHRAE, „Guideline 14-2014: Measurement of Energy, Demand, and Water Savings,“ 2014.
- [38] Wissenschaftliche Begleitforschung Energiewendebauen, „Perspektiven und Werkstätten der Energiewende - Dokumentation des 9. Projektleitungstreffens,“ 2021.
- [39] M. D. Morris, „Actorial sampling plans for preliminary computational experiments,“ *Technometrics*, 1991.

- [40] I. M. Sobol, „Sensitivity analysis for non-linear mathematical models,“ *Mathematical Modeling & Computational Experiment*, 1993.
- [41] J. Richarz, T. Osterhage und D. Müller, „Building Simulation Conference 2021: 17th Conference of IBPSA,“ in *Robust optimal identification and scheduling of modernization measures for typical buildings*, 2021.
- [42] F. Seefeldt, D. Rau und M. Hoch, „Fachkräftebedarf für die Energiewende in Gebäuden,“ 2018. [Online]. Available: <https://www.prognos.com/de/projekt/fachkraeftebedarf-fuer-die-energiewende-gebaeuden>. [Zugriff am 12.12.2023].
- [43] T. Kenkmann und S. Braungardt, „Öko-Institut e.V,“ 2018. [Online]. Available: <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/Handwerker-als-Umsetzer-Policy-Paper.pdf>. [Zugriff am 12.12.2023].
- [44] J. Richarz, N. Fuchs und D. H. % D. Müller, „Modernization roadmaps for existing buildings under limited energy resources and craftworks capacities,“ *Energies*, 2023.
- [45] M. Neitzel, D. Dangel, W. Gottschalk, H. Schröder, N. Raschper und B. Wiblishauser, „Bericht der Baukostensenkungskommission,“ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, 2015.
- [46] K. Lorenz-Hennig, „Maßnahmenpaket Baukostensenkung - Umsetzungsstand der Empfehlungen der Baukostensenkungskommission und Ausblick,“ Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat (BMI), 2019.
- [47] S. Blum, A. Lückert und H.-M. Barth, „Studie zu Maßnahmen für kostengünstig-nachhaltigen Wohnraum,“ Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR), 2023.
- [48] M. Neitzel, P. Nehls und T. Schulze, „Aktualisierung der Baupreis- und Baukostenentwicklung,“ Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung, 2020.
- [49] R. Mendelevitch, J. Repenning, F. C. Matthes und J. Deurer, „Treibhausgasprojektionen 2024 für Deutschland - Rahmendaten,“ Umwelt Bundesamt, 2023.
- [50] S. B. (Destatis), „Genesis-Online,“ Abrufdatum 09.12.2024.
- [51] S. Dorn-Pfahler, S. Rexroth, U. Pottgiesser, G. Löhnert, A. Dalkowski, S. Gutt, I. Wiederoder, C. Wiwiorra, F. May und K. Singhal, „Variowohnungen,“ Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR), 2021.
- [52] M. W. u. J. Harris, „Intelligent skins,“ *Oxford: Architectural Press*, 2002.
- [53] D. Clements-Croome, Hrsg., *Intelligent buildings*, Reprinted. Hrsg., London: Telford, 2004, p. 408.
- [54] J. Wong, H. Li und S. W. Wang, „Intelligent building research: a review,“ *Automation in Construction*, Bd. 14, Nr. 1, p. 143–159, 2005.
- [55] D. Clements-Croome, Hrsg., *Intelligent buildings*, 2. ed. Hrsg., London: ICE Publ, 2013, p. 344.

-
- [56] C. S. Kerr, „A review of the evidence on the importance of sensory design for intelligent buildings,“ *Intelligent Buildings International*, Bd. 5, Nr. 4, p. 204–212, 2013.
- [57] H. Farhangi, „The path of the smart grid,“ *IEEE Power and Energy Magazine*, Bd. 8, Nr. 1, p. 18–28, 2010.
- [58] A. Chaudhari und P. Mulay, „A bibliometric survey on incremental clustering algorithm for electricity smart meter data analysis,“ *Iran Journal of Computer Science*, Bd. 2, Nr. 4, p. 197–206, 2019.
- [59] B. M. Pfeiffer und R. Dittmar, „Modellbasierte prädiktive Regelung,“ München, De Gruyter, 2004.
- [60] J. Weyer und M. Roos, „Agentenbasierte Modellierung und Simulation,“ in *TATuP*, Bde. %1 von %2Jg. 26, Nr. 3, 2017, pp. 11-16.
- [61] 30000-1:2006, EVO, „Concepts and Practices for Determining Energy Savings in New Construction,“ in *IPMVP International Performance Measurement and Verification Protocol Volume III Part I*, Efficiency Valuation Organization (EVO), 2006.
- [62] Universität Magdeburg et. al., „Open Energy Platform,“ 2024. [Online]. Available: <https://openenergyplatform.org>. [Zugriff am 01 10 2024].
- [63] EnOB Forschung für Energieoptimiertes Bauen, „Leitfaden für das Monitoring der Demonstrationsbauten im Förderkonzept EnBau und EnSan,“ Oktober 2014.
- [64] *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*, Beuth Verlag, Sep 2018.
- [65] K.-U. Ahn, D.-W. Kim, C.-S. Park und P. Wilde, „Predictability of occupant presence and performance gap in building energy simulation,“ *Applied Energy*, Bd. 208, p. 1639–1652, 2017.
- [66] W. O’Brien, I. Gaetani, S. Gilani, S. Carlucci, P.-J. Hoes und J. Hensen, „International survey on current occupant modelling approaches in building performance simulation,“ *Journal of Building Performance Simulation*, Bd. 10, Nr. 5-6, p. 653–671, 2017.
- [67] F. Stazi, F. Naspi und M. D’Orazio, „A literature review on driving factors and contextual events influencing occupants’ behaviours in buildings,“ *Building and Environment*, Bd. 118, p. 40–66, 2017.
- [68] E. Venturi, F. Ochs und G. Dermentzis, „Identifying the influence of user behaviour on building energy consumption based on model-based analysis of in-situ monitoring data,“ *Journal of Building Engineering*, Bd. 64, p. 105717, 2023.
- [69] Z. Deme Belafi, T. Hong und A. Reith, „A critical review on questionnaire surveys in the field of energy-related occupant behaviour,“ *Energy Efficiency*, Bd. 11, Nr. 8, p. 2157–2177, 2018.
- [70] Z. Lu, J. Qi, J. Zhang, L. He und H. Zhao, „Modelling dynamic demand response for plug-in hybrid electric vehicles based on real-time charging pricing,“ *IET Generation, Transmission & Distribution*, Bd. 11, Nr. 1, p. 228–235, 2017.

- [71] N. Daina, A. Sivakumar und J. W. Polak, „Electric vehicle charging choices: Modelling and implications for smart charging services,“ *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Bd. 81, p. 36–56, 2017.
- [72] Z. Zhao, W. C. Lee, Y. Shin und K.-B. Song, „An Optimal Power Scheduling Method for Demand Response in Home Energy Management System,“ *IEEE Transactions on Smart Grid*, Bd. 4, Nr. 3, p. 1391–1400, 2013.
- [73] A. Anvari-Moghaddam, H. Monsef und A. Rahimi-Kian, „Optimal Smart Home Energy Management Considering Energy Saving and a Comfortable Lifestyle,“ *IEEE Transactions on Smart Grid*, Bd. 6, Nr. 1, p. 324–332, 2015.
- [74] A. Ogunjuyigbe, T. R. Ayodele und O. A. Akinola, „User satisfaction-induced demand side load management in residential buildings with user budget constraint,“ *Applied Energy*, Bd. 187, p. 352–366, 2017.
- [75] I. Gaetani, P.-J. Hoes und J. L. Hensen, „Estimating the influence of occupant behavior on building heating and cooling energy in one simulation run,“ *Applied Energy*, Bd. 223, p. 159–171, 2018.
- [76] S. Carlucci, M. Simone, S. K. Firth, M. B. Kjærgaard, R. Markovic, M. S. Rahaman, M. K. Annaqeeb, S. Biandrate, A. Das, J. W. Dziejczak, G. Fajilla, M. Favero, M. Ferrando, J. Hahn, M. Han, Y. Peng, F. Salim, A. Schlüter und C. van Treeck, „Modeling occupant behavior in buildings,“ *Building and Environment*, Bd. 174, p. 106768, 2020.
- [77] S. R. West, J. K. Ward und J. Wall, „Trial results from a model predictive control and optimisation system for commercial building HVAC,“ *Energy and Buildings*, Bd. 72, p. 271–279, 2014.
- [78] I. Georgievski, V. Degeler, G. A. Pagani, T. A. Nguyen, A. Lazovik und M. Aiello, „Optimizing Energy Costs for Offices Connected to the Smart Grid,“ *IEEE Transactions on Smart Grid*, Bd. 3, Nr. 4, p. 2273–2285, 2012.
- [79] V. Marinakis, H. Doukas, E. Spiliotis und I. Papastamatiou, „Decision Support for Intelligent Energy Management in Buildings Using the Thermal Comfort Model,“ *International Journal of Computational Intelligence Systems*, Bd. 10, Nr. 1, p. 882, 2017.
- [80] M. S. Mahdavinejad, M. Rezvan, M. Barekatin, P. Adibi, P. Barnaghi und A. P. Sheth, „Machine learning for internet of things data analysis: a survey,“ *Digital Communications and Networks*, Bd. 4, Nr. 3, p. 161–175, 2018.
- [81] W. J. Karplus, „The spectrum of mathematical modeling and systems simulation,“ *Mathematics and Computers in Simulation*, Bd. 19, Nr. 1, p. 3–10, 1977.
- [82] O. Loyola-Gonzalez, „Black-Box vs. White-Box: Understanding Their Advantages and Weaknesses From a Practical Point of View,“ *IEEE Access*, Bd. 7, p. 154096–154113, 2019.
- [83] A. P. Plageras, K. E. Psannis, C. Stergiou, H. Wang und B. B. Gupta, „Efficient IoT-based sensor BIG Data collection–processing and analysis in smart buildings,“ *Future Generation Computer Systems*, Bd. 82, p. 349–357, 2018.

-
- [84] K. Amasyali und N. M. El-Gohary, „A review of data-driven building energy consumption prediction studies,“ *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Bd. 81, p. 1192–1205, 2018.
- [85] Y. Zhao, C. Zhang, Y. Zhang, Z. Wang und J. Li, „A review of data mining technologies in building energy systems: Load prediction, pattern identification, fault detection and diagnosis,“ *Energy and Built Environment*, Bd. 1, Nr. 2, p. 149–164, 2020.
- [86] J. Zheng, „Urban residential energy efficiency - technology optimization and behaviour change: Case study on social housing in Darmstadt, Germany,“ Technische Universität Darmstadt.
- [87] I. Bellanco, E. Fuentes, M. Vallès und J. Salom, „A review of the fault behavior of heat pumps and measurements, detection and diagnosis methods including virtual sensors,“ *Journal of Building Engineering*, Bd. 39, p. 102254, 2021.
- [88] Piotr A. Domanski, Hugh Henderson und William V. Payne, „Sensitivity Analysis of Installation Faults on Heat Pump Performance,“ 2014.
- [89] S. Katipamula und M. Brambley, „Review Article: Methods for Fault Detection, Diagnostics, and Prognostics for Building Systems—A Review, Part II,“ *HVAC&R Research*, Bd. 11, Nr. 2, p. 169–187, 2005.
- [90] C. Yang, W. Shen, Q. Chen und B. Gunay, „A practical solution for HVAC prognostics: Failure mode and effects analysis in building maintenance,“ *Journal of Building Engineering*, Bd. 15, p. 26–32, 2018.
- [91] E. Mills, „Building commissioning: a golden opportunity for reducing energy costs and greenhouse gas emissions in the United States,“ *Energy Efficiency*, Bd. 4, Nr. 2, p. 145–173, 2011.
- [92] E. Haselsteiner, A. Bodvay, S. Gosztonyi, A. Preisler, M. Berger und B. Gasser, *Low Tech - High Effect! Eine Übersicht über nachhaltige Low Tech Gebäude*, Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, Hrsg., Wien, 2016, p. 192.
- [93] E. P. u. R. d. E. Union, Richtlinie (EU) 2018/844 vom 30. Mai 2018 zur Änderung der Richtlinie 2010/31/EU über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden und der Richtlinie 2012/27/EU über Energieeffizienz., Amtsblatt der Europäischen Union, L 156/75.
- [94] F. J. G. - I. o. C. a. E. S. (ICE), „EG2050: LLEC-Verwaltungsbau: Klimaneutraler Verwaltungsbau als aktiver Teil des Living Lab Energy Campus (LLEC). Förderzeitraum: 01.01.2018 - 30.06.2025, FKZ: 03EGB0010A“.
- [95] T. U. D. u. E.-P. G. Hochschule für angewandte Wissenschaften München, „EnOB: Plus-EQ-Net - Netzneutrales Wohn- und Geschäftshaus plusG in Geretsried. Verbundvorhaben, Förderzeitraum: 01.07.2017 - 30.06.2021, FKZ: 03ET1299“.
- [96] H. f. a. W. M. T. H. N. G. S. O. u. E.-P. G. ASSMANN BERATEN + PLANEN GmbH, „EnOB: plus-EQ-Net_II - Netzneutrales Wohn- und Geschäftshaus plusG in Geretsried - Monitoringphase. Verbundvorhaben, Förderzeitraum: 01.08.2021 - 31.07.2024, FKZ: 03EN1046“.
- [97] W.-S. P. m. & C. B. KG, „EG2050: Campo_V: Umsetzung, Monitoring und Betriebsoptimierung eines nahezu klimaneutralen Gebäudes – 'AktivPLUS Studentenwohnheim CampoV'. Verbundvorhaben, Förderzeitraum: 01.03.2018 - 31.08.2021, FKZ: 03EGB0011“.

- [98] T. U. B. Freiberg, „Eversol-MFH - Technisch-wirtschaftliche und soziologische Evaluierung vernetzter hochgradig solar versorgter Mehrfamilienhäuser bei Einführung eines Pauschal-Mietmodells. Förderzeitraum: 01.04.2018 - 30.06.2023, FKZ: 03ETS004“.
- [99] B. W. GmbH, „EG2050: MFH Möhringen - Umsetzung, Monitoring und Betriebsoptimierung eines nahezu klimaneutralen Gebäudes - 'AktivPLUS Mehrfamilienhaus in Stuttgart Möhringen'. Förderzeitraum: 01.08.2018 - 31.07.2023, FKZ: 03EGB0015“.
- [100] H. D. - I. f. I. u. u. S. (In-LUST), „EG2050: SDE21-MI-MO - Teilnahme des Teams MI-MO der Hochschule Düsseldorf am Solar Decathlon Europe 2021 in Wuppertal. Förderzeitraum: 01.12.2020 - 31.12.2022, FKZ: 03EGB0031“.
- [101] H. f. T. S. Z. f. i. Architektur, „EG2050: SDE21 - coLLab - Teilnahme des Teams coLLab der HFT Stuttgart am Solar Decathlon Europe 2021. Förderzeitraum: 01.12.2020 - 31.10.2022, FKZ: 03EGB0028“.
- [102] HEA – Fachgemeinschaft für effiziente Energieanwendung e. V. mit Unterstützung von BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V., „Smart Readiness Indicator (SRI),“ 1. Auflage, Februar 2019.
- [103] M. Offermann, D. Gräf, B. Oschatz, B. Mailach, B. Köhler, S. Braungardt, C. Sprengard und A. i. A. v. B. Barckhausen, „Anpassung der SRI-Systematik für eine Einführung in Deutschland,“ Berlin, Dresden, Freiburg, Gräfelfing, Köln, 2022.
- [104] K. Klein und D. Kalz, *Netzreaktive Gebäude - Ganzheitliche Bewertung von Bauphysik und Gebäudeenergiesystemen einschliesslich ihrer Rolle in der Energiewirtschaft: Energie, Exergie, Leistungsbezug und -abgabe. Abschlussbericht 2017.*
- [105] EURELECTRIC, *Flexibility and Aggregation Requirements for their interaction in the market.*
- [106] Nationale Plattform Zukunft der Mobilität - Arbeitsgruppe 5 "Digitalisierung für den Mobilitätssektor", *Netzintegration von Elektromobilität – Basis für eine erfolgreiche Sektorkopplung. Eine Definition.*, Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, Hrsg.
- [107] B. Verbruggen und J. Driesen, „Grid Impact Indicators for Active Building Simulations,“ *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, Bd. 6, Nr. 1, p. 43–50, 2015.
- [108] L. Einheilig, M. Herrmann, J. Kappl, O. Stumpp und K. Zech, *Smart Grid 2019 - Netzdienliche Leistungen über Smart Metering als neues und standardisiertes Instrument im Verteilernetz, 2019.*
- [109] Wissenschaftliche Begleitforschung Energiewendebauen, „Dokumentation des 11. Projektleitungstreffens - Betrieb als Chance zur dauerhaften Effizienzsteigerung,“ 2022.
- [110] S. Kippelt, *Dezentrale Flexibilitätsoptionen und ihr Beitrag zum Ausgleich der fluktuierenden Stromerzeugung Erneuerbarer Energien*, Shaker Verlag, 2017.
- [111] T. Schütz, L. Shiffer, H. Harb, M. Fuchs und D. Müller, „Optimal design of energy conversion units and envelopes for residential building retrofits using a comprehensive MILP model,“ *Applied Energy*, Bd. 185, Nr. 1, pp. 1-15, 2017.

-
- [112] T. Loga, B. Stein, N. Diefenbach und R. Born, „Deutsche Wohngebäudetypologie. Beispielhafte Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz von typischen Wohngebäuden,“ 2015.
- [113] Typologie und Bestand beheizter Nichtwohngebäude in Deutschland, Bde. %1 von %22011,16, Bonn: Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR), 2011, pp. Online-Ressource.
- [114] P. Remmen, M. Lauster, M. Mans, M. Fuchs, T. Osterhage und D. Müller, „TEASER: an open tool for urban energy modelling of building stocks,“ *Journal of Building Performance Simulation*, Bd. 11, Nr. 1, p. 84–98, 2018.
- [115] J. Le Dréau und P. Heiselberg, „Energy flexibility of residential buildings using short term heat storage in the thermal mass,“ *Energy*, Bd. 111, p. 991–1002, 2016.
- [116] J. Salom, J. Widén, J. Candanedo, I. Sartori, K. Voss und A. Marszal, „Understanding net zero energy buildings: Evaluation of load matching and grid interaction indicators,“ in *6. Proceedings of Building Simulation 2011: 12th Conference of International Building Performance Simulation Association*, p. 2514–2521.
- [117] C. R. De, R. Baetens, R. Verbruggen, J. Driesen und L. Helsen, „Modelling and simulation of a grid connected photovoltaic heat pump system with thermal energy storage using Modelica,“ 2010, p. P177.
- [118] Lehrstuhl für Gebäude- und Raumklimattechnik der RWTH Aachen, „Masterarbeit Menghan Ge - Analyse und Bewertung verschiedener Flexibilitätsoptionen zur Gestaltung netzreaktiver Gebäude,“ 05 Mai 2022. [Online]. Available: <https://www.ebc.eonerc.rwth-aachen.de/cms/eon-erc-ebc/studium/studien-und-abschlussarbeiten/abgeschlossene-studien-und-abschlussarb/masterarbeiten/~vwssc/masterarbeit-menghan-ge/>. [Zugriff am 25 November 2024].
- [119] N. Langreder, F. Lettow, M. Sahnoun, S. Kreidelmeyer, A. Wünsche, S. Lengning, S. Lübbers, N. Thamling, I. Ziegenhagen, M. Wunsch, S. Ortner, A. Paar, L. Johannsen, P. Mellwig, B. Otto und P. Radgen, „Technikkatalog Wärmeplanung 1.1,“ 2024. [Online]. Available: https://api.kww-halle.de/fileadmin/user_upload/Technikkatalog_W%C3%A4rmeplanung_Version_1.1_August24.xlsx.
- [120] J. Kozłowska, *Metodyka analizy strategicznej przedsiębiorstwa na potrzeby integracji produktowo-usługowej*, Białystok: Oficyna Wydawnicza Politechniki Białostockiej, 2020.
- [121] M. Bagheri, E. Dönitz, S. Yu und H. Brugger, „Exploration of qualitative scenarios towards climate neutrality of the German building sector,“ *eceee Summer Study 2024. Proceedings*, 2024.
- [122] S. Yu und Z. Hou, „Melodie: Agent-based Modeling in Python,“ *JOSS*, 2023.
- [123] Statistische Ämter des Bundes und der Länder, „Zensus 2011: Vielfältiges Deutschland - Endgültige Ergebnisse,“ 2016.
- [124] M. Pesaresi und P. Politis, „GHS-BUILT-S R2023A - GHS built-up surface grid, derived from Sentinel2 composite and Landsat, multitemporal (1975-2030),“ 2023.

- [125] P. Martino und P. Politis, „GHS-BUILT-C R2023A - GHS Settlement Characteristics, derived from Sentinel2 composite (2018) and other GHS R2023A data,“ 2023.
- [126] M. Schiavina, M. Melchiorri und M. Pesaresi, „GHS-SMOD R2023A - GHS settlement layers, application of the Degree of Urbanisation methodology (stage I) to GHS-POP R2023A and GHS-BUILT-S R2023A, multitemporal (1975-2030)“.
- [127] H. Cischinsky und N. Diefenbach, „Datenerhebung Wohngebäudebestand 2016. Datenerhebung zu den energetischen Merkmalen und Modernisierungsraten,“ IWU Institut Wohnen und Umwelt, 2013.
- [128] M. Hörner, H. Cischinsky, J. Bischof, S. Schwarz, M. Behnisch, G. Meinel, G. Spars und R. Busch, „Forschungsdatenbank NichtWohnGebäude - Repräsentative Primärdatenerhebung zur statistisch validen Erfassung und Auswertung der Struktur und der energetischen Qualität des Nichtwohngebäudebestands in Deutschland.,“ IWU Institut Wohnen und Umwelt, Darmstadt, 2022.
- [129] D. E.-A. GmbH, „Der dena-Gebäudereport 2016. Statistiken und Analysen zur Energieeffizienz im Gebäudebestand.,“ Berlin, 2016.
- [130] S. Alibas und S. Yu, „Developing a regionalized representative building stock model for Germany,“ *eceee Summer Study 2024. Proceedings*, 2024.
- [131] K. Goulouti, D. Favre, M. Giorgi, P. Padey, A. Galimshina, G. Habert und S. Lasvaux, „Dataset of service life data for 100 building elements and technical systems including their descriptive statistics and fitting to lognormal distribution,“ *Data in Brief*, 2021.
- [132] M. Sunikka-Blank und R. Galvin, „Introducing the rebound effect: the gap between performance and actual energy consumption,“ *Building Research & Information*, pp. 260-273, 2012.
- [133] BMWK, „Zahlen und Fakten: Energiedaten. Nationale und internationale Entwicklung,“ 2022.
- [134] C. Rohde und S. Arnold-Keifer, „Erstellung von Anwendungsbilanzen für die Jahre 2021 bis 2023 für die Sektoren Industrie und GHD. Studie für die Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V. (AGEB),“ 2023.
- [135] S. Bundesamt, „Gebäude und Wohnungen. Bestand an Wohnungen und Wohngebäuden Bauabgang von Wohnungen und Wohngebäuden Lange Reihen ab 1969 - 2021,“ 2022.
- [136] E. Commission, „Comprehensive study of building energy renovation activities and the uptake of nearly zero-energy buildings in the EU - Annex to final report,“ 2019.
- [137] S. Alibas und S. Yu, „Developing a regionalized representative building stock model for Germany,“ 2024.
- [138] S. Alibas, M. Bagheri und S. Yu, „Analyse der Einsparpotenziale an Energie und CO₂-Emissionen im deutschen Gebäudebestand unter verschiedenen Szenarien,“ 2024.
- [139] Eurostat, „Statistical regions in the European Union and partner countries: NUTS and statistical regions 2021,“ Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2022.

-
- [140] „Gebäudeenergiegesetz,“ Bundesministerium für Justiz, 2024. [Online]. Available: <https://www.gesetze-im-internet.de/geg/index.html>.
- [141] „Bürgerliches Gesetzbuch,“ Bundesministerium für Justiz, 2024. [Online]. Available: <https://www.gesetze-im-internet.de/geg/index.html>.
- [142] „Gesetz zur Aufteilung der Kohlendioxidkosten (Kohlendioxidkostenaufteilungsgesetz - CO2KostAufG),“ [Online]. Available: <https://www.gesetze-im-internet.de/co2kostaufg/BJNR215400022.html#BJNR215400022BJNG000300000>. [Zugriff am 10 06 2024].
- [143] „Bundesförderung für effiziente Gebäude,“ Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle, 2024. [Online]. Available: https://www.bafa.de/DE/Energie/Effiziente_Gebaeude/effiziente_gebaeude_node.html.
- [144] „Erneuerbare Energien Gesetz,“ Bundesministerium für Justiz, 2023. [Online]. Available: https://www.gesetze-im-internet.de/eeg_2014/index.html.
- [145] „Gesetz für die Erhaltung, die Modernisierung und den Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung,“ [Online]. Available: https://www.gesetze-im-internet.de/kwkg_2016/. [Zugriff am 12 11 2024].
- [146] „Landesbauordnung NRW,“ [Online]. Available: <https://www.land.nrw/pressemitteilung/ministerin-scharrenbach-update-der-landesbauordnung-nordrhein-westfalen-fuer-mehr>. [Zugriff am 1 7 2024].
- [147] „Bundes-Klimaschutzgesetz,“ Bundesministerium für Justiz, 2024. [Online]. Available: <https://www.gesetze-im-internet.de/ksg/index.html>.
- [148] „Bundesförderung Energieberatung für Wohngebäude,“ [Online]. Available: https://www.bafa.de/DE/Energie/Energieberatung/Energieberatung_Wohngebaeude/energieberatung_wohngebaeude_node.html. [Zugriff am 07 05 2024].
- [149] „Bundesförderung Energieberatung für Wohngebäude,“ [Online]. Available: https://www.bafa.de/DE/Energie/Energieberatung/Energieberatung_Wohngebaeude/energieberatung_wohngebaeude_node.html. [Zugriff am 12 11 2024].
- [150] „Steuerliche Förderung energetischer Gebäudesanierung,“ [Online]. Available: <https://www.bundesfinanzministerium.de/Content/DE/Standardartikel/Themen/Schlaglichter/Klimaschutz/steuerliche-foerderung-energetischer-gebaeudesanierungen.html>. [Zugriff am 08 05 2024].
- [151] „Gesetz zur Ordnung des Wasserhaushalts,“ 03 07 2024. [Online]. Available: https://www.gesetze-im-internet.de/whg_2009/WHG.pdf.
- [152] „Verordnung über Einzugsgebiete von Entnahmestellen für die Trinkwassergewinnung,“ 04 12 2023. [Online]. Available: <https://www.gesetze-im-internet.de/trinkwegv/BJNR15A0A0023.html>.
- [153] „Auslegung von oberflächennahen Erdwärmekollektoren,“ BDH und bwp, 03 2011. [Online]. Available: https://www.waermepumpe.de/uploads/tx_bcpagflip/bwp-Infoblatt43-Erdwaermekollektoren.pdf.

- [154] „Verordnung über fluorierte Treibhausgase,“ 20 02 2024. [Online]. Available: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=OJ:L_202400573.
- [155] „Photovoltaik-Strategie,“ 03 2023. [Online]. Available: https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/photovoltaik-strategie-2023-entwurf.pdf?__blob=publicationFile&v=12.
- [156] „PV-Bürokratieabbau,“ bne, 11 05 2022. [Online]. Available: https://www.bne-online.de/wp-content/uploads/bne-Positionspapier_Buerokratieabbau_fuer_dezentrale_Photovoltaik.pdf.
- [157] „Verordnung über Allgemeine Bedingungen für den Netzanschluss und dessen Nutzung für die Elektrizitätsversorgung in Niederspannung,“ 01 11 2006. [Online]. Available: <https://www.gesetze-im-internet.de/nav/BJNR247710006.html>.
- [158] „Brandschutz bei der PV-Planung,“ pv-wissen, 11 2024. [Online]. Available: <https://www.pv-wissen.de/brandschutz-bei-der-pv-planung/?advertising=true>.
- [159] „Photovoltaikanlagen: Worauf es beim Brandschutz ankommt,“ Brandschutz Informationsportal TÜV Süd, 10 09 2024. [Online]. Available: <https://de-brandschutz-informationsportal.tuvsud.com/artikel/Photovoltaikanlagen-Brandschutz.html>.
- [160] „Zählerschrank PV-Anlage: Voraussetzungen für Photovoltaik-Systeme,“ Home&Smart, 07 06 2024. [Online]. Available: <https://www.homeandsmart.de/solaranlage-zaehlerschrank>.
- [161] „Gesetz über die Elektrizitäts- und Gasversorgung,“ 08 05 2024. [Online]. Available: https://www.gesetze-im-internet.de/enwg_2005/_42a.html.
- [162] „Photovoltaikwärme vs. Solarthermie - Kosten- und Flächenvergleich,“ MYPV Empowering the Solar Future, 19 02 2024. [Online]. Available: <https://www.mypv.com/de/news/photovoltaikwaerme-vs-solarthermie-kosten-und-flaechenvergleich/>.
- [163] „Leitfaden zu Anmeldung und steuerlichen Behandlung von kleinen BHKW,“ ASUE, 12 2020. [Online]. Available: https://asue.de/sites/default/files/asue/themen/blockheizkraftwerke/2020/broschueren/ASUE_Leitfaden_Steuerliche-Behandlung-Anmeldung_Mini-BHKW_2020-12.pdf.
- [164] „Aktuelle Hemmnisse und Maßnahmen zur Weiterentwicklung der KWK und des KWKG,“ bdew, 01 02 2024. [Online]. Available: https://www.bdew.de/media/documents/2024-02-01_Positionspapier_aktueller_Stand_KWK_KWKG_oA.pdf.
- [165] „Messtechnik, Abrechnung und Digitalisierung der Energiewende,“ 19 11 2024. [Online]. Available: <https://www.dvgw.de/themen/gas/infrastruktur/messtechnik-abrechnung-und-digitalisierung-der-energiewende>.
- [166] „Geschäftsmodelle für Power-to-Gas und Power-to-Liquid,“ 02 2022. [Online]. Available: https://www.ioew.de/fileadmin/user_upload/BILDER_und_Downloaddateien/Publikationen/Schriftenreihen/IOEW_SR_221_Geschaeftsmodelle_fuer_Power-to-Gas_und_Power-to-Liquid.pdf.
- [167] „Power to Gas: Schlüsseltechnologie der Energiewende,“ 13 11 2024. [Online]. Available: <https://www.dvgw.de/themen/energiewende/power-to-gas>.

-
- [168] „Neukonzeption des Gebäudeenergiegesetzes zur Erreichung eines klimaneutralen Gebäudebestandes,“ 09 2021. [Online]. Available: https://www.ifeu.de/fileadmin/uploads/pdf/_ifeu_et_al._2021__GEG_2.0.pdf.
- [169] Prof. Dr.-Ing. Dieter Wolff, Prof. Dr.-Ing. Kati Jagnow, „Wie man die Energie und Wärmewende beschleunigt,“ 7 2022. [Online]. Available: <https://www.delta-q.de/wp-content/uploads/2022-Wie-man-die-Energie-und-Waermewende-beschleunigt.pdf>.
- [170] C. M. Ritter, „Energieeffizienz: Regulierung für Wohngebäude wirkt,“ Bd. 38, 2017.
- [171] „Kurzgutachten „Warmmietenmodelle“,“ 2022. [Online]. Available: <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/Kurzgutachten-Warmmietenmodelle.pdf>.
- [172] „Maßnahmenpakete für die Gebäudewende: Eine Policy Analyse,“ 5 7 2024. [Online]. Available: https://transparente-gebaeudehuelle.de/sites/default/files/2024-07/Langfassung_Massnahmenpakete-fuer-mehr-Gebaeudesanierung.pdf.
- [173] „Energetische Sanierung: Diese Förderungen gibt es 2024,“ 8 2 2024. [Online]. Available: <https://www.deutsche-handwerks-zeitung.de/energetische-sanierung-diese-foerderungen-gibt-es-2024-331417/>.
- [174] „Reduktion und Regulierung von Embodied-Carbon-Emissionen im deutschen Gebäudesektor,“ 11 2024. [Online]. Available: https://www.agora-industrie.de/fileadmin/Projekte/2022/2022-10_IND_Embodied_Carbon/A-IN_341_Embodied_Carbon_WEB.pdf.
- [175] „Graue Energie im Ordnungsrecht/Förderung,“ 6 2 2019. [Online]. Available: https://egs-plan.de/web/images/magazin/PDF-Dateien/190206-Endbericht-Graue-Energie-im-Ordnungsrecht_Final.pdf.
- [176] „TABULA Web Tool,“ 03 12 2024. [Online]. Available: <https://webtool.building-typology.eu/#bm>.
- [177] N. Fuchs, J. Baumgärtner, D. Hering und D. Müller, „36th International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems (ECOS 2023),“ in *Development of an Optimization-Based Methodology for Subsidy Programs in Residential Buildings*, Las Palmas de Gran Canaria, Spain, 2023.
- [178] N. Fuchs, J. Baumgärtner, L. Maier und D. Müller, „Development of an optimization-based methodology for subsidy programs of residential buildings,“ *Applied Thermal Engineering*, 2025.
- [179] „Impulse für die Umsetzung der Energiewende aus der Begleitforschung Energiewendebauen Modul 2 (Gebäude): Modellbasierte Untersuchung des Mietenden-Vermietenden Dilemmas,“ 2023.
- [180] H. Roos, *Hydraulik der Wasserheizung*, 4. Auflage Hrsg., München: Oldenbourg Verlag, 1999.
- [181] „Das Fachkräfte-Dilemma der Solarbranche in Deutschland bewältigen,“ *Praxedo*, 25 09 2024. [Online]. Available: <https://www.praxedo.de/blog/fachkraeftemangel-pv/>.

- [182] „Sozialverträgliche Dekarbonisierung im Gebäudebestand,“ 5 2024. [Online]. Available: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/11850/publikationen/05_2024_texte_sozialvertraegliche_dekarbonisierung.pdf.
- [183] M. Hörner, H. Cischinsky, J. Bischof, S. Schwarz, M. Behnisch, G. Meinel, G. Spars und R. Busch, „Forschungsdatenbank NichtWohnGebäude - Repräsentative Primärdatenerhebung zur statistisch validen Erfassung und Auswertung der Struktur und der energetischen Qualität des Nichtwohngebäudebestands in Deutschland.,“ IWU Institut Wohnen und Umwelt, Darmstadt, 2022.
- [184] M. Wigginton und J. Harris, Intelligent skins, Oxford: Architectural Press, 2002, p. 176.
- [185] European Climate + Energy Modelling Forum (ECEMF), „ECEMP 2024,“ 2024. [Online]. Available: <https://www.ecemf.eu/ecemp/ecemp-2024/>.
- [186] BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V., „Versorgungssicherheit Strom - Grundlagen und Methodik zur Bewertung der Versorgungssicherheit Strom und politische Handlungsempfehlungen,“ 2021.