

ENERGIEWENDEBAUEN

Forschungserkenntnisse
von der Komponente bis zum Quartier



ENERGIEWENDEBAUEN

Forschungserkenntnisse
von der Komponente bis zum Quartier

ENERGIEWENDEBAUEN

Forschungserkenntnisse
von der Komponente bis zum Quartier

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

VORWORT des BMWi

Sehr geehrte Damen und Herren,

auf den Gebäudesektor entfallen rund 35 % des derzeitigen Gesamtenergiebedarfs in unserem Land: Energieoptimierte Gebäude, intelligente Steuerung und Vernetzung sowie eine wirtschaftliche und klimafreundliche Energieversorgung der Gebäude und Quartiere sind daher zentraler Bestandteil für eine erfolgreiche Energie- und Wärmewende.

Die Energieforschung als strategisches Element der Energiewende trägt wesentlich dazu bei, die energie- und klimapolitischen Ziele im Gebäudesektor durch innovative Technologien und Konzepte zu erreichen. Dazu entwickeln Forscherinnen und Forscher neue Materialien und Baustoffe und arbeiten an Innovationen für eine hocheffiziente Gebäude- und Versorgungstechnik. Denn bei der Forschung für energieoptimiertes Bauen werden neben einzelnen Gebäuden auch ihre Schnittstellen zum lokalen Energiesystem betrachtet, da sie als Energiesenke, Energiequelle oder Energiespeicher dienen können. Bei der Entwicklung solcher Systemlösungen spielt die Digitalisierung eine wesentliche Rolle: Durch intelligente Vernetzung und Steuerung können Gebäude und Quartiere flexibel und bedarfsgerecht mit dem Energieversorgungssystem interagieren. Um Nah- und Fernwärme energieeffizient bereitstellen zu können, sind Leitungsnetze und eine geeignete Infrastruktur für das Energiemanagement erforderlich. Dabei können Synergieeffekte durch

die Kopplung der Sektoren Strom, Wärme und Verkehr genutzt werden, um die Effizienz weiter zu erhöhen, mehr erneuerbare Energien zu integrieren und die Dekarbonisierung des Energiesystems voran zu bringen.

All dies sind wichtige Forschungsthemen, um heute schon Lösungen vorzubereiten, die zur Erreichung der nationalen und europäischen Ziele beitragen. Damit dies gelingen kann, ist die Übertragung der Forschungsergebnisse in die Praxis ein wichtiger Erfolgsfaktor. Darum hat das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) die Forschungsinitiative Energiewendebauen und das gleichnamige Forschungsnetzwerk im Rahmen des 7. Energieforschungsprogramms ins Leben gerufen und seine vielfältigen Innovationsmaßnahmen gebündelt. Mit den Reallaboren der Energiewende wurde zudem eine neue Fördersäule etabliert, um innovative Technologien rasch in die Anwendung zu bringen und im industriellen Maßstab vor Ort zu erproben.

Der Innovations- und Wissenstransfer steht auch im Fokus dieser Publikation. Sie ist Ergebnis der wissenschaftlichen Begleitforschung, die in den vergangenen Jahren Erkenntnisse aus zahlreichen Forschungs- und Demonstrationsprojekten gesammelt, analysiert und aufbereitet hat. Der umfassende Überblick über die Forschungsinitiative Energie-

wendebauen des BMWi soll zudem Forscherinnen und Forschern in Instituten und Unternehmen ermutigen, gemeinsam an Zukunftslösungen zu arbeiten und die Entwicklungen auf dem Weg zum klimaneutralen Gebäudebestand mitzugestalten!

Ihr
Thorsten Herdan

Abteilungsleiter – Energiepolitik – Wärme und Effizienz
im Bundesministerium für Wirtschaft und Energie

VORWORT der Begleitforschung

Liebe Leserin,
Lieber Leser,

ich freue mich, dass Sie mit dem Lesen dieser Zeilen Interesse an unserer Zusammenstellung von Erkenntnissen aus vier Jahren Begleitforschung „Energie in Gebäuden und Quartieren“ haben. Zu Beginn dieses Vorworts möchte ich mich gleich beim Ministerium für Wirtschaft und Energie (BMW) und dem Projektträger Jülich (PtJ) bedanken, dass Sie diese Arbeiten ermöglicht haben und wir als Team „BF2016“ viele spannende Projekte aus dem Energieforschungsbereich begleiten, auswerten und besuchen durften.

Das Team BF2016 umfasst Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter von drei Instituten der Fraunhofer-Gesellschaft (AST, IBP und UMSICHT) sowie zwei Instituten der RWTH Aachen (ebc, E3D). Durch die intensive organisatorische Betreuung von Frau Dr. Tanja Osterhage ist aus den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern der unterschiedlichen Institutionen schnell ein echtes Team geworden, das auch die großen Aufgaben und Veranstaltungsformate, wie unsere beiden Kongresse und die vielen Projektleitermeetings, gemeinschaftlich umsetzen und auswerten konnte. Durch diese gute Arbeit des Teams war meine Aufgabe als Leiter der Begleitforschung „Gebäude und Quartiere“ übersichtlich und angenehm. Dafür bedanke ich mich ausdrücklich bei allen Mitgliedern des Teams BF2016.

Was ist die Aufgabe einer Begleitforschung? In gewisser Weise handelt es sich streng genommen um Forschung über Forschung – und ja, es ist in dieser Hinsicht ein zweiter Blick auf die vielen laufenden Forschungsprojekte des BMW) aus diesem Förderbereich mit der Aufgabe, Ergebnisse und offene Fragestellungen zu extrahieren, Vorhaben zu sortieren und systematischen Auswertungen zu unterziehen und den wichtigen Austausch zwischen Projektnehmern und Vertretern aus den unterschiedlichen Bereichen der Baupraxis zu intensivieren. Es ist natürlich nicht die Aufgabe der Begleitforschung, einzelne Projekte zu bewerten. Vielmehr soll durch den Informationsaustausch und Veranstaltungen den Projektleitenden die Möglichkeit gegeben werden, von anderen Projekten zu lernen und bewährte Ansätze zu übernehmen. Die Energiewende steht insbesondere bei Fragestellungen zu Sanierungsmaßnahmen und zur Umsetzung von Quartierskonzepten noch ganz am Anfang des Weges, daher ist ein enger Austausch mit allen Akteuren und die aktive Einbindung von Nutzern¹ im Sinne von Partizipationsprozessen von größter Bedeutung.

Die BF2016 konnte während der letzten vier Jahre vier methodische Ansätze für die Erfüllung ihrer Aufgaben nutzen: die Querauswertungen, die „Tiefenbohrungen“, neue Datenbanken und unter-

schiedliche Veranstaltungsformate. Die Querauswertung unterschiedlicher Projekte zeigt sowohl die Konvergenz von Ergebnissen als auch wiederkehrende Hemmnisse auf, die in vielen Projekten überwunden werden müssen. Gleichzeitig weisen große Differenzen zwischen Forschungsergebnissen auf einen zusätzlichen Forschungsbedarf hin, um die notwendige Klarheit zu erhalten. Mit einer „Tiefenbohrung“ kann ein bestimmtes Konzept oder eine bestimmte Technik über mehrere Projekte hinweg bewertet werden. Dadurch kann die Begleitforschung einen eigenen Mehrwert schaffen, ohne dass zusätzliche Untersuchungen notwendig sind.

Das Thema der Daten und Datenbanken hat einen besonderen Stellenwert bei der BF2016 eingenommen. Da wir aktuell mehr als 1.000 laufende Projekte des BMWi im Bereich Gebäude und Quartiere verzeichnen dürfen, ist ein hohes Maß an Transparenz und Übersicht ein wichtiger Baustein für alle beteiligten Experten, die Politik und die Öffentlichkeit. Aus diesem Grund haben wir die digitale Projektlandkarte entwickelt, die für jeden Interessierten über die Homepage Energiewendebauen zugänglich ist. Alle BMWi-Projekte des Forschungsbereichs Energie in Gebäuden und Quartieren sind auf der Projektlandkarte geografisch verortet und können mit unterschiedlichen Filtern ausgewertet und visualisiert werden.

Die Datenbasis für die Projektlandkarte speist sich aus den öffentlich zugänglichen Informationen der Projekte sowie Kernelementen aus den neuen, elektronischen Fragebögen, die durch die BF2016

an alle Projektnehmer verschickt worden sind. Auch wenn mir bewusst ist, dass wir mit diesen Fragebögen nicht nur Begeisterung bei den Projektnehmern ausgelöst haben, bin ich mir sicher, dass wir mit dieser neuen Methodik über die nächsten Jahre eine immer bessere Auswertbarkeit von Projektclustern erreichen werden. Und vielleicht werden diese Fragebögen zukünftig auch andere Berichtspflichten vereinfachen, sodass keine Zeit für die Forschung verloren geht.

Die zweite Baustelle aus dem Bereich der Datenbanken war die Konzeption einer neuen Messdatenbank, in der die äußerst wertvollen Daten aus den Monitoringprojekten gespeichert werden können. Diese Daten sollten langfristig allen Forschenden im Rahmen von Projekten zugänglich gemacht werden, sodass Doppelarbeit vermieden und die Überprüfbarkeit von Ergebnissen im Sinne guter wissenschaftlicher Arbeit sichergestellt werden kann. Im Rahmen dieser Aktivitäten ist über den PtJ zusätzlich ein Rechtsgutachten erstellt worden, in dem die Nutzungsmöglichkeiten dieser Daten spezifiziert werden. Für diese Arbeit hat die BF2016 die Anforderungen der Projektnehmer gesammelt und mit der beauftragten Kanzlei konkretisiert.

Unser vierter methodischer Baustein sind die verschiedenen Veranstaltungen und Veranstaltungsformate. Im Rahmen kleiner Think Tanks wurde sehr detailliert mit Experten über aktuelle Themen der Energiewende diskutiert, in größeren Workshops wurden Meinungen und Thesen unterschiedlicher Akteursgruppen eingesammelt und zusammenge-

fasst. Im Rahmen von Projektleitertreffen konnten die Forschenden in einen direkten Austausch untereinander und mit der BF2016 gebracht werden. Dieses letzte Format war auch eine Reise durch unser Land, da wir immer wieder von Projektleitern eingeladen wurden, die Veranstaltung am Ort ihres Wirkens in Kombination mit einem unverfälschten Blick auf den Stand der Dinge machen zu dürfen. Dafür möchte ich an dieser Stelle meinen besonderen Dank aussprechen. Alle acht Projektleitertreffen waren ausgebucht. Auch das zeigt, dieses Format, welches im Rahmen der vorangegangenen Begleitforschung EnEff:Stadt erfunden worden ist, sollte auch in Zukunft weitergeführt werden.

Nun fehlt noch ein letzter Absatz mit einer fachlichen Zusammenfassung der letzten vier Jahre Begleitforschung. Das ist leider nicht so einfach. Wir haben viele gute Projekte mit eindrucksvollen Lösungen für mehr Energieeffizienz im Gebäude- und Quartierkontext gesehen. Zusätzlich wird in vielen Projekten mit Beteiligung von Planern, Anlagenbauern und Herstellern an neuen Ideen und Produkten gearbeitet, die für die Umsetzung der Energiewende unerlässlich sind. Einige Beispiele werden sie in diesem Buch und den Schriftreihen der BF2016 finden.

Ein Blick auf die nackten Zahlen zeigt jedoch, dass wir insgesamt mit der Energiewende für unsere Gebäude und Quartiere noch ganz am Anfang stehen. Die Sanierung des Gebäudebestands und die technische und regulatorische Ermöglichung von Quartiersprojekten sind die großen Bausteine für die nächsten Jahre. Für den Erfolg müssen wir al-

les einsetzen, was wir in dem Baukasten der Energiesystemtechnik finden können: unterschiedliche Energiewandler, Netze, Speicher und die neuen Möglichkeiten der Informations- und Kommunikationstechnik, die ein Geschenk für die Orchestrierung einer dezentralen und regenerativ dominierten Energieversorgung sind.

So können wir in Verbindung mit einer innovativen Bautechnik und einer geschickten Sektorenkopplung unter Einbindung der Mobilität unsere Ziele für den Klimaschutz in den kommenden Jahrzehnten erreichen. Trotz vieler Hindernisse und Bedenken bin ich an dieser Stelle grundsätzlich zuversichtlich, da kritischer Optimismus nie schadet und wir im Rahmen der BF2016-Aktivitäten viele motivierte und fähige Mitstreiter kennenlernen durften.

Danke für das Lesen dieser Zeilen verbunden mit der Aufforderung, ruhig einen weiteren Blick in dieses Buch zu werfen.

Dirk Müller

01

Digitale Projektlandkarte

02

Monitoringdatenbank

03

Metaanalyse Energiewendebauen

04

Konzepte & Methoden

05

Gebäude

06

Quartiere

07

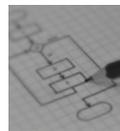
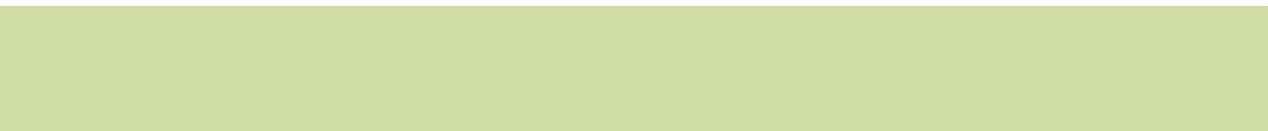
Versorgungsnetze

08

Neue Technologien

09

Digitale Werkzeuge



00 VORWORT

Vorwort des BMWi	5–6
Vorwort der Begleitforschung	7–9

01 DIGITALE PROJEKTLANDKARTE

Krämer, B. | Frisch, J. | van Treeck, C.

Aufgabe der Projektlandkarte	1.1	27–28
Datengrundlage	1.2	28–29

02 MONITORING-DATENBANK

Miehlich, A. | Frisch, J. | van Treeck, C.

Die zentrale Monitoringdatenbank	2.1	33
Die BF-Toolbox: Unterstützung der zentralen Monitoringdatenbank	2.2	33–35
BF-Tool: Datenfeldbezeichner	2.3	35–37
BF-Tool: HDF5-Container-Creator	2.4	37–38

BF-Tool: Datenübertrager	2.5	39–40
Ausblick: Zentrale Monitoringdatenbank / Rechtsgutachten	2.6	40–41

03 METAANALYSE ENERGIEWENDEBAUEN

Richarz, J. | Wegewitz, S. | Osterhage, T. | Müller, D.

Einleitung	3.1	45
Wissenschaftlicher Hintergrund	3.2	45–48
Quantitative Befragung durch Fragebögen		46–47
Textmining und Netzwerkanalyse		47–48
Methoden zur Datenerfassung	3.3	49–52
Quantitative Befragungen		49–50
Semantische Analyse mittels Textmining		51–52
Methode zur Datenauswertung	3.4	52–53
Ergebnisse	3.5	53–62
Quantitative Befragung		53–58
Textmining und Netzwerkanalysen		58–62
Evaluation der Methode	3.6	62–65
Umfragebeteiligung und Antwortqualität		62–64
Beobachtete Vor- und Nachteile der Umfragen		64–65
Fazit und Ausblick	3.7	65–66

04 KONZEPTE & METHODEN

Erhorn-Kluttig, H. Erhorn, H. Lylsow, L.		
Motivation	4.1	71–72
Gebäudebewertung über Primärenergie oder Treibhausgasemissionen?	4.2	72–75
Smart Readiness Indicator für Gebäude	4.3	75–77
Netzreaktive Gebäude	4.4	78–80
Schmelzer, C. Georgii, M. Orozaliev, J. Kusyy, O. Vajen, K. Bonk, N. Drück, H.		
Anlagensysteme: SolarCheck – Funktionsfähigkeit thermischer Solaranlagen	4.5	83–89
Merkmale der Testmethode		83–85
Arbeitsschritte im Projekt		85–86
Ergebnisse / Schlussfolgerungen		86–89
Wilson, H. R. Bueno, B. Baesch, B. Illg, H.		
Gebäudehülle: Textil-KFFS - Bewertung textiler Sonnenschutzkomponenten	4.6	90–98
Arbeitsschritte im Projekt Textil-KFFS		91–96
Schlussfolgerungen		96–97

Estevam Schmiedt, J. Peichl, M. Plattner, S. Pless, S. Götttsche, J.		
Kurzzeitmessung: Gtom – Energetische Analyse von Gebäudehüllen	4.7	99–105
Merkmale der Testmethode		99–100
Arbeitsschritte im Projekt		100–104
Ergebnisse / Schlussfolgerung		104
Bücker, D. Hager, M. Wieser, R. Grimm, S.		
Betriebsoptimierung: Nemo–Wärmenetze im energetischen Monitoring	4.8	106–112
Merkmale der Methode		106–107
Arbeitsschritte im Projekt		107–110
Ergebnisse / Schlussfolgerungen		110–111

05 GEBÄUDE

Beckhölter, T. Ladermann, S. Osterhage, T. Müller, D.		
Der Gebäudesektor	5.1	117–119
Gebäudeprojekte in der Wissenschaftlichen Begleitforschung		117–118
Fokus Bestand		119
Differenzierung Wohn- und Nichtwohngebäude	5.2	119–122
Energetische Bestandssanierung	5.3	122–123
Energetische Betriebsoptimierung bei Bestandsgebäuden	5.4	123–125

Energetische Sanierung mit zusätzlicher Betriebsoptimierung	5.5	125
Schwickert, S. Glahn, O.		
Plusenergieschule Detmold	5.6	128–134
Sanierung		128–129
Potenzial Gebäudetyp		129
Betriebsoptimierung		129–133
Sick, F. Dietz, S.		
degewo ZKH: Klimagerechte Sanierung eines MFH Betriebsergebnisse	5.7	135–142
Einleitung		135
Das degewo Zukunftshaus		135–136
Monitoringergebnisse und Betriebsoptimierung		136–141
Fazit		141
Lauss, L. Heißler, M. Auer, T. Mehnert, J. Reiß, D. Stüber, S.		
Forschungsprojekt „Big Data für EnBop“	5.8	143–150
Einleitung		143–144
Praktischer Teil		144–149
Schlussfolgerung		149

06 QUARTIERE

Schnier, M. Witkowski, S. Seelig, T. Beier, C.		
Quartierslösungen – komplexe Konzepte mit großem Potenzial	6.1	155–159
Internationale und nationale CO ₂ - Reduktionsziele mit Fokus auf Gebäude und Quartiere		155

Nicht nur Gebäudeeffizienz: Bedeutung und Potenzial von Quartierskonzepten		156
Forschung zu Gebäuden und Quartieren im 7. Energieforschungsprogramm		156–157
Der Ansatz der energetischen Quartiersplanung		157–158
Energiekonzepte für Stadtquartiere		158–159
Quartiersprojekte in der Forschungsinitiative Energiewendebauen	6.2	159–168
Übersicht über ausgewertete Projekte und Quartiere		159–163
Quartierstypen und Energieversorgung		163–165
Zusammenfassung		166–167
Brennenstuhl, M. Pietruschka, D. Pietzsch, U. Zeh, R. Stockinger, V.		
Vision 2020: kommunale netzgebundene Energieversorgung in Wüstenrot	6.3	169–176
Die Siedlung „Vordere Viehweide“ als Baustein zum Plusenergiestatus		169–172
Die Siedlung geht „in Betrieb“		172–174
Lessons Learned		174–175
Ditzen, C. Garrecht, H.		
Energieoptimiertes Quartier Margarethenhöhe Essen (EnQM)	6.4	177–183
Ausgangssituation		178
Energetische Konzepte		179–180
Erkenntnisse aus Planung und Umsetzung		180–183

07 VERSORGUNGS- NETZE

Kharboutli, S. | Flemming, S. | Bretschneider, P. |
Beier, C. | Schnier, M.

Einführung und Relevanz 7.1 187–189

**Aufarbeitung relevanter Ergebnisse der
Wissenschaftlichen Begleitforschung** 7.2 190–199

Integration erneuerbarer Energien in Wärmenetzen 190-195
Sektorenkopplung 195-197

Hanßke, A. | Bschorer, S.

**Effiziente Kälteversorgung durch intelligent gekoppelte
Netze** 7.3 200–206

Projekthintergrund und Problemstellung 201

Konzeption einer energiemedienübergreifenden
Netzstruktur 201–205

Fazit 205–206

08 NEUE TECHNOLOGIEN

Zhang, Y. | Welter, S. | Osterhage, T. | Müller, D.

Technologien in Gebäuden und Quartieren 8.1 211

Bautechnische Innovation in der Forschung 8.2 211–214

Komponenten für Dämmung und Wärmeschutz 211–212

Aktive und adaptive Bauteile 213

Fenster 214

Anlagentechnische Innovationen in der Forschung	8.3	214–218
Wärmeerzeuger		215–217
Energiespeicher		217–218
Zusammenfassung	8.4	219
Pahn, M. Penkert, F. Gauer, T. Kiesche, M. Keller, M. L. Kerspe, J. Friedrich, T. Fischer, M.		
Multifunktionale Betonfertigteilelemente mit schaltbarer Vakuumdämmung	8.5	221–229
Einleitung		221
Aufbau und Funktionalitäten des Wandelementes		221–222
Thermische Komponenten für das Gebäudeenergiekonzept		222–225
Umsetzung der Ergebnisse aus dem Forschungsvorhaben		225–228
Schlussfolgerung		228
Engelmann, P. Frison, L. Felsmann, C. Schmidt, J. Koenigsdorff, R. Bachseitz, M. Rehm, M. Kitzig, J.-P. Massa Gray, F. Gall, J.		
Prädiktive Regelstrategien für netzdienlichen Betrieb von Wärmepumpen	8.6	230–238
Das Gebäudeenergiesystem der Zukunft		230
Technische Herausforderungen eines netzdienlichen Wärmepumpenbetriebs		230–232
Prädiktive Regelung von Wärmepumpen		232–235
Zusammenfassung und Ausblick		236

Fisch, N. | Wilken, T. | Zimmermann, J. | Drück, H.

Solare Wärmenetze mit saisonalen Multifunktionswärmespeichern	8.7	239–247
Technologieübersicht		239–240
Langzeitauswertung		241
Innovative Konzepte		242–246
Zusammenfassung		246

09 DIGITALE WERKZEUGE

van Treeck, C. | Kirnats, L. | Joost, J. | Berg, S. | Frisch, J.

Motivation und Hintergrund der Studie	9.1	251–252
Wissenschaftliche Begleitforschung	9.2	252
Methodik	9.3	252–254
Terminologie	9.4	254–255
Ergebnisse	9.5	255–263
Querschnittsübergreifende Relevanz von Entwicklungen		255–256
Typologie softwarebasierter Lösungsansätze		256–257
Tendenz zur Multi-Skalen Modellierung		257–258
Programmiertechnische Umsetzung		258–259
Lizenzierung und Zielgruppen		259–260
Auswertung: Zielgruppen und Anwendung		260–261
Digitales Ökosystem der Anwendung		261–263
Zusammenfassung und Ausblick	9.6	263–265

Nicolai, A.		
Qualitätssicherung von Simulationsprogrammen für die energetisch optimale Planung und Sanierung von Gebäuden	9.7	266–272
Einleitung		266–267
Qualitätssicherung im Softwareerstellungprozess		267–271
Vergleichende Funktionsprüfung und Zertifizierung		271–272
Kirchhof, J. Michael, J. Rumpe, B.		
Softwarequalität in Energieprojekten	9.8	273–279
Einleitung		273
Adäquate Softwarearchitekturen		273–274
Agilität im Entwicklungsprozess		274–276
Wiederverwendung und Konfigurabilität		276–277
Zusammenfassung		278
Spinnräker, E. Koschwitz, D. Frisch, J. van Treeck C.		
Demonstration integraler Prozessketten im Anwendungsfall der Quartierssimulation	9.9	280–295
Einführung		280–281
Datensatz zur Modelldemonstration		281–284
Methoden		285–289
Ergebnisse		290–293
Fazit		293

10 VERÖFFENTLICHUNGEN DER BEGLEITFORSCHUNG

Veröffentlichungen der Wissenschaftlichen Begleitforschung	298–301
Tabellenverzeichnis	302–303
Abbildungsverzeichnis	304–313
Abkürzungsverzeichnis	314–317
Impressum	319





DIGITALE
PROJEKTLANDKARTE



01



DIGITALE PROJEKTLANDKARTE

1.1 Aufgabe der Projektlandkarte

1.2 Datengrundlage



Bei der digitalen Projektlandkarte handelt es sich um eine Webplattform mit einer geografischen Verortung, übersichtlichen Darstellung und Sammlung projektspezifischer Informationen sämtlicher geförderter Forschungsprojekte im Bereich „Energie in Gebäuden und Quartieren“.

Die digitale Projektlandkarte stellt damit eines der zentralen Elemente auf der Webplattform Energiewendebauen dar und kann unter folgender Adresse erreicht werden:
<https://projektinfos.energiewendebauen.de/projektlandkarte/>

1.1 Aufgabe der Projektlandkarte

Das Ziel der digitalen Projektlandkarte ist die übersichtliche und öffentlichkeitswirksame Darstellung sämtlicher geförderter Forschungsprojekte im Bereich „Energie in Gebäuden und Quartieren“. Die grafische Oberfläche der Projektlandkarte bietet, neben einer standortbezogenen Darstellung mittels Geo-Web Services, Zugang zu einer Kurzdarstellung der Projekte mit Projektstammdaten, Eckpunkten des Forschungsvorhabens sowie Kernergebnissen mit Verknüpfungen zu weiterführenden Informationsquellen.

Die Projektlandkarte ist damit ein neues, interaktives Tool, das eine klar strukturierte Übersicht aller Forschungsprojekte und eine Vernetzung verschiedener Informationsquellen ermöglicht.

Sie dient damit unter anderem Projektnehmern¹ bei der Recherche zu themenverwandten Projekten oder der interessierten Öffentlichkeit als erste Anlaufstelle zur transparenten Übersicht über die Tätigkeiten im Bereich der Forschung für energieoptimierte Gebäude und Quartiere.

Neben der geografischen Verortung der Projekte auf der Hauptseite besitzt jedes Projekt eine eigene Seite mit projektspezifischen Informationen. Hier werden neben Projektstammdaten wie der Laufzeit, der zugehörigen Förderrichtlinie und der Fördersumme weiterführende Informationen zum Projektvorhaben, aktuelle Meldungen und Kontaktpersonen angegeben.

¹Alle Personenbezeichnungen in diesem Buch beziehen sich auf Personen jeglichen Geschlechts.

Über eine ausführliche Suchmaske ist es möglich, die Projektauswahl auf ausgewählte Filterkategorien zu beschränken, um so eine themen- oder re-



The screenshot displays the 'Projektlandkarte' interface. At the top, there are navigation tabs: FORSCHUNG, THEMEN, PROJEKTLANDKARTE, PUBLIKATIONEN, FORSCHUNG IM DIALOG, and SERVICE. The main header includes 'Projektlandkarte' and 'Erweiterte Suche'. Below this is a search bar labeled 'FREITEXTSUCHE' with a magnifying glass icon and a 'Filter zurücksetzen' button. To the left, there are dropdown menus for 'Projekttypen' with categories: GEBÄUDE, METHODEN UND KONZEPTE, NUTZERAKZEPTANZ, QUARTIER, TECHNOLOGIEENTWICKLUNG, TOOLS, and VERSORGNUNGSNETZE. To the right, there are filters for 'Gebiet' (BUNDESLAND), 'PLZ / ORT', 'UMKREIS' (12km), and 'PROJEKTLAUFEITEN' (2016-2024). Below the filters, it shows '1226 Ergebnisse'. The central part of the interface is a map of Germany with numerous green circular markers, each containing a number representing the count of projects in that region. Below the map, there is a 'PROJEKTE' section with three project cards. Each card features a title, a brief description, and a 'Mehr erfahren' button.

Project ID	Project Name	Organization	Duration
03EWF0308	SmartQuart	Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen ReifLab:SmartQuart	Mehr erfahren
03FT14556	EnEff-Stadt: Drei Prozent Plus	DEUTSCHER VERBAND FÜR WOHNUNGSWESEN, STÄDTBAU UND RAUMORDNUNG E.V.	Mehr erfahren
03ET14418	EnEff-Stadt: Herzo_Opt	FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR BAUPHYSIK (IBP)	Mehr erfahren

Abb. 1.1-1: Standardansicht der Projektlandkarte mit der geografischen Verortung der Forschungsprojekte

gionsspezifische Projektsuche zu ermöglichen. Zudem werden zu verschiedenen Themenkategorien Visualisierungen angeboten, um einen direkten grafischen Überblick zu bestimmten Bereichen zu ermöglichen. Die Darstellung der Visualisierungen ist dabei dynamisch abhängig von den getroffenen Filtereinstellungen.

Weiterhin ist es möglich, Projekte tabellarisch miteinander zu vergleichen. Hierzu können Projekte an verschiedenen Stellen zum Vergleich hinzugefügt werden. Nach Abschluss der Auswahl wird der Nutzer nach einem Klick auf den Button „Projektvergleich“ am oberen rechten Seitenrand auf eine neue Seite geleitet, auf der die ausgewählten Projekte in einer Tabelle dargestellt werden.

1.2 Datengrundlage

Die grundlegenden Projektstammdaten, wie Laufzeit oder Fördersumme, werden direkt von EnArgus genutzt und automatisch an die Projektlandkarte weitergeleitet. Die größte projektspezifische Datengrundlage bilden die Rückläufe des Fragebogens der Wissenschaftlichen Begleitforschung. Dabei handelt es sich um einen detaillierten Fragebogen mit dem Ziel einer möglichst homogenen Datenabfrage über alle Projekte hinweg. Der Fragebogen wurde jährlich versendet und ermöglicht so eine sukzessiv steigende Informationsgrundlage entlang des Projektverlaufs. Weitere Infos zum Fragebogen sind in Kapitel 03 zu finden. Auch zukünftig wird Projektnehmern über ein Abfrageformat die Möglichkeit

Projektvergleich			
Allgemeine Informationen	<input type="checkbox"/> Projekt entfernen Zur Seite >	<input type="checkbox"/> Projekt entfernen Zur Seite >	<input type="checkbox"/> Projekt entfernen Zur Seite >
Projekttyp	Gebäude, Technologie, Tool, Konzept	Gebäude, Technologie, Netz, Tool	keine Angabe
Förderinitiative	Energieoptimiertes Bauen (EnOB)	Energieoptimiertes Bauen (EnOB)	EnEff:Wärme
Bewilligte Summe	337.266 €	890.545 €	359.173 €
Bundesland	Bayern	Nordrhein-Westfalen	Berlin
Laufzeit	01/2017 bis 12/2019	01/2017 bis 02/2022	03/2020 bis 02/2024
Toolspezifische Informationen			
Programmiersprache	R	MATLAB/Simulink	Python
Gebäudespezifische Informationen			
Anzahl Gebäude	1	2	5
Anzahl Sensoren	150	2000	350
Netzspezifische Informationen			
Vorlauftemperatur	keine Angabe	75	30
Anzahl Abnehmer	keine Angabe	3	25

Abb. 1.1-2: Beispielhafte Darstellung des Projektvergleichs

gegeben, Informationen über das eigene Projekt anzugeben.

Die Informationen werden anschließend für die Darstellung auf der Projektlandkarte vereinheitlicht und automatisiert übertragen. Sämtliche dort angegebenen Informationen dienen somit als inhaltliche Grundlage, sowohl für die jeweilige Projektdetailseite als auch für die oben genannten Funktionalitäten wie Filterungen, Visualisierungen und den Projektvergleich.

Neben den Informationen aus EnArgus und dem Fragebogen der Begleitforschung existieren häufig weitere öffentlich verfügbare Informationen. Problematisch bei diesen Informationen ist prinzipiell die Heterogenität, sowohl inhaltlich als auch von der Art der Darstellung. Das Ziel ist auf Grund der großen und weiter steigenden Anzahl von Projekten im Bereich „Energie in Gebäuden und Quartieren“, einen realisierbaren und zukunftsfähigen Prozess aufzustellen. Deshalb ist die Anwendung einheitlicher Schnittstellen notwendig, um den Prozess zu automatisieren. Da der Output von Forschungsprojekten üblicherweise in Veröffentlichungen (z. B. Beiträge zu wissenschaftlichen Konferenzen, Journalbeiträge, usw.) dargestellt und zusammengefasst wird, wurden daher weitere, öffentlich zugängliche Datenquellen an die Datengrundlage der Projektlandkarte angebunden. Allgemein verfügbare Veröffentlichungen werden somit ebenfalls automatisiert den entsprechenden Projekten zugeordnet und auf der jeweiligen Projektdetailseite dargestellt.

Die Informationsgrundlage der Projektlandkarte wird strukturell und inhaltlich stetig erweitert, um auch zukünftig immer eine aktuelle Übersicht über

die Aktivitäten der Forschungsprojekte bieten zu können.



Die Projektlandkarte ist öffentlich über die Webplattform des Förderbereichs Energiewendebauen zu erreichen: <https://projektinfos.energie-wendebauen.de/projektlandkarte/>

Kontakt-Adresse:

RWTH Aachen
Lehrstuhl für Energieeffizientes Bauen

Ben Krämer, M.Sc.
kraemer@e3d.rwth-aachen.de

Dr.-Ing. Jérôme Frisch
frisch@e3d.rwth-aachen.de

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Christoph van Treeck
treeck@e3d.rwth-aachen.de





MONITORING-
DATENBANK



02

MONITORING-DATENBANK

2.1 Die zentrale Monitoringdatenbank

2.2 Die BF-Toolbox: Unterstützung der zentralen Monitoringdatenbank

2.3 BF-Tool: Datenfeldbezeichner

2.4 BF-Tool: HDF5-Container-Creator

2.5 BF-Tool: Datenübertrager

2.6 Ausblick: Zentrale Monitoringdatenbank / Rechtsgutachten



Dieses Kapitel beschäftigt sich mit der zentralen Monitoringdatenbank, ihren Eigenschaften und ihrer Umsetzung. Um die Nachnutzung von Monitoringdaten in Zukunft zu ermöglichen, müssen Messdaten konsistent, zugänglich und dokumentiert gesichert werden. Die drei Tools der Wissenschaftlichen Begleitforschung Datenfeldbezeichner, HDF5-Container-Creator sowie der Datenübertrager sollen Projektnehmer bei der Umsetzung ihrer Vorhaben unterstützen und die notwendige Struktur der zentralen Monitoringdatenbank ermöglichen.

2.1 Die zentrale Monitoringdatenbank

Die zentrale Monitoringdatenbank ist ein Instrument der Wissenschaftlichen Begleitforschung, um Monitoringdaten für die Nachnutzung durch die Forschungslandschaft bereitzustellen. Die Energiewende und zunehmende Digitalisierung sind Anlass zur optimierten Nutzung von Messdaten, welche immer die Basis jeglicher Erkenntnisse sind. Durch technische und softwareseitige Entwicklungen können immer genauere und immer mehr Messdaten aufgenommen und verarbeitet werden. Es wird daher zunehmend wichtiger, dass Datengrundlagen nicht nur einem Zweck dienen, sondern auch im Sinne zukünftig angewandter Methoden eingesetzt und genutzt werden können.

Für Forschungsprojekte im Bausektor sind Messdaten essenziell, um die Effizienz beispielsweise von neuartigen Technologien, baulichen Maßnahmen oder Steuerungsalgorithmen zu belegen. Energieforschungsprojekte mit Gebäudebezug weisen starke Gemeinsamkeiten hinsichtlich der zu messenden Datenwerte und insbesondere des gemeinsamen Ziels der Verringerung des Energiebedarfs auf. Eine Vielzahl an Stellschrauben zur Erreichung des Ziels können datenseitig erfasst werden.

Mit Hilfe der Monitoringdatenbank wird dem Datenbankbetreiber, sowie befugten Nutzern, ein direkter Vergleich zwischen Projekten vor und nach der Planung, sowie während der Ausführung ermöglicht. Weiterhin kann durch die Datenbank eine Querschnittsuntersuchung aller Forschungsprojekte durch andere, nicht in der Planung involvierten Forschungsprojekte durchgeführt werden. Dies be-

trifft insbesondere die Softwareentwicklung für Regelungsstrategien, aber auch zunehmend genutzte Machine- oder Deep-Learning Verfahren, welche auf validierte Trainingsdaten angewiesen sind. Weitere Nutzungen, die sich dadurch in Zukunft ergeben werden, sind heute vielleicht ungewiss, jedoch ist eine robuste Basis die einzige Möglichkeit für einen längerfristigen Erfolg der Datenbank, die im Rahmen der Begleitforschung entwickelt wurde.

2.2 Die BF-Toolbox: Unterstützung der zentralen Monitoringdatenbank

Die zentrale Monitoringdatenbank lebt von mehreren Faktoren und wird durch diese auch auf lange Sicht am Leben erhalten. Diese sind insbesondere Konsistenz, Zugänglichkeit und Dokumentation. Die Konsistenz beschreibt die einheitliche Ordnung und Datenfeldbezeichnung innerhalb der Datenbank und trägt maßgeblich zu ihrer Langlebigkeit bei. Hierarchisch betrachtet muss eine übergeordnete Struktur vorhanden sein, ähnlich der Struktur in einem Ordnersystem eines beliebigen Betriebssystems. Jegliche darunter eingeordneten Strukturen müssen zurückverfolgbar sein und mit jeder tieferen Ebene immer detailliertere Informationen bis hin zu einem einzelnen Datenwert eines Datenfeldes aufweisen.

Konsistenz bezieht sich neben der Struktur ebenfalls auf die Bezeichnung dieser Datenfelder. Mit Hinblick auf das Monitoring bezeichnet ein Datenfeld jegliche von einem individuellen Sensor aufgezeichneten und gesicherten Datenpunkte. Um Sensoren bezüglich der von ihnen gemessenen Größe, ihrer

Lage und weiteren möglichen Parametern voneinander unterscheiden zu können, müssen die Datenfelder mit Hilfe eines sogenannten Datenschlüssels voneinander abgegrenzt werden.

Sofern alle Datenfelder eines Projektes in einem Set individuell benannt sind, herrscht eine projektscharfe Konsistenz. Um diese Konsistenz auch projektübergreifend auf der gesamten Datenbank zu ermöglichen, muss ein einheitliches Bezeichnungsschema eingeführt werden.

Zugänglichkeit wird über das Dateiformat und die periphere Software erreicht. Im Falle dieser Datenbank wird die Zugänglichkeit über die Import- und Exportformate ermöglicht. Das Dateiformat .csv ist ein solches Exportformat, da es durch eine Vielzahl von Softwaretools verarbeitet oder erstellt werden kann. Das Dateiformat, in dem die Monitoringdaten auf der Datenbank vorhanden sind, ist .hdf5¹ und ermöglicht eine hierarchische Strukturierung der Datenfelder. Der Dateixport von der Datenbank zu einem Nutzer ist jedoch entkoppelt von dem nativen Dateiformat. Bei Bedarf kann das native .hdf5 Format oder ein anderweitiges Exportformat wie .csv genutzt werden.

Dokumentationen sind unerlässlich, sowohl für den Betreiber und Nutzer der Datenbank, als auch für die Interpretation der Daten in der Datenbank. Eine Dokumentation soll immer zum Verständnis einer Sachlage dienen. Im Falle der Datenbank muss die Erzeugung der Konsistenz beschrieben werden und im Falle einzelner Datenfelder muss die Herkunft der Daten, die Datenart und gegebenenfalls die

Messgenauigkeit dokumentiert sein. Datenreihen ohne Bezug, Beschreibung oder Charakteristika besitzen in einer solchen umfassend genutzten Datenbank keinen Wert. Dies gilt sowohl in der Forschung als auch in anderen Belangen. Die Dokumentation des Bezeichnungsschemas der Datenfelder ist daher als Schlüssel zum Verständnis der Datenbank zu betrachten. In der folgenden Abbildung 2.2-1 ist die Struktur der Datenbank mit ihren definitiven Bestandteilen dargestellt:

Das Erreichen der dargelegten Eigenschaften der Datenbank ist nur möglich, sofern jegliche in ihr auf-

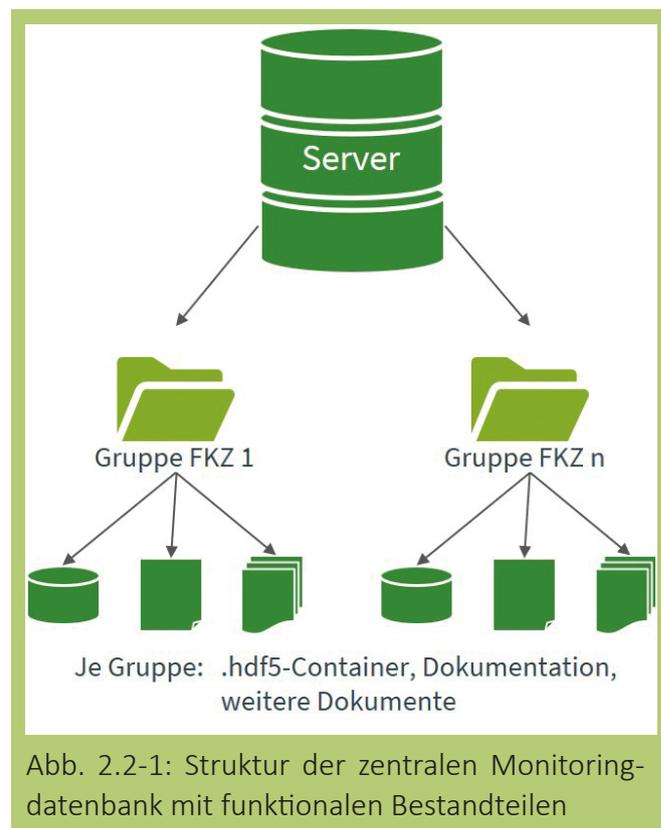


Abb. 2.2-1: Struktur der zentralen Monitoringdatenbank mit funktionalen Bestandteilen

¹<https://www.hdfgroup.org/solutions/hdf5/>

genommenen Daten die drei Prinzipien Konsistenz, Zugänglichkeit und Dokumentation berücksichtigen. Zu diesem Zweck wurde die Toolbox der Begleitforschung entwickelt, welche unabhängig vom Betriebssystem Java-basiert betrieben werden kann. Die Toolbox stellt einen existenziellen Bestandteil der Monitoringdatenbank dar, da sie die Anwendung der beschriebenen Prinzipien auf Messdaten durchsetzt.

2.3 BF-Tool: Datenfeldbezeichner

Das BF-Tool Datenfeldbezeichner basiert auf dem sich ständig weiterentwickelnden Datenschlüsselbezeichnungssystem „Buildings Unified Data point naming schema for Operation management“, kurz BUDO², dessen Ursprung in der Gebäudeautomation liegt. Das Schlüsselssystem vereint und vereinheitlicht eine Vielzahl bestehender, in der Praxis genutzter Systeme zur Bezeichnung von Datenfeldern. Durch das so entstandene umfangreiche Vokabular ist BUDO dazu prädestiniert, auch in der Monitoringdatenbank breitenwirksam Anwendung zu finden.

Der Datenfeldbezeichner ist eine modifizierte Umsetzung des ursprünglichen BUDO-Excelschemas. Die Struktur der Bezeichnerlogik im Original sowie in der java-basierten Umsetzung baut auf einem Abhängigkeitsprinzip auf. Eltern-Kind-Beziehungen geben dafür den logischen Rahmen vor. In der vorgeschlagenen Toolbox wurde die Nutzerführung durch diese Abhängigkeitsprinzipien optimiert, so-

dass ein Datenfeldbezeichner sehr leicht systematisch aufgebaut werden kann.

Ein Datenfeldbezeichner besteht dabei aus mehreren Hauptkategorien. Diese sind derzeit acht freie Kategorien sowie die standardisierten Hauptkategorien System, Subsystem, Subsystem, Medium, Datenpunkt und Funktionsart.

Wie in Abbildung 2.3-1 zur Oberfläche des BF-Tools: Datenfeldbezeichner zu sehen ist, unterstützt der dynamische Aufbau des Datenschlüssels die Übersichtlichkeit des Tools. Mit der Auswahl einer Hauptkategorie eröffnen sich weitere Eingabeoptionen. Beispielsweise kann als 1. freie Kategorie „Gebäude“ ausgewählt werden. Darauf folgend kann dieses Gebäude nun durch eine Spezifikation näher beschrieben werden, wie beispielsweise die Gebäudeart oder im Freitextfeld durch eine genaue Bezeichnung oder Hausnummer. Abhängigkeiten der Vokabeln untereinander sind hinterlegt, sodass im Rahmen einer Hauptkategorie nur logische Zeichenfolgen zugelassen sind. Dies ist ein sehr wichtiges Kriterium für das automatisierte Auslesen solcher Felder.

Die freien Kategorien 1 und 6 sind voneinander unabhängig auswählbar und bedingen jeweils die fortlaufende Auswahl nachfolgender freier Kategorien. Die Auswahl der ersten freien Kategorie ermöglicht erst die Auswahl der zweiten und die Auswahl dieser dann die Auswahl der dritten bis hin zur fünften freien Kategorie. Die Auswahl der sechsten freien Kategorie eröffnet auf dieselbe Weise die Auswahl der siebten und achten freien Kategorie. Der Grund für dieses Schema ist der Nutzungsvorschlag des Bezeichnungsschemas, physikalische Einheiten an

²<https://www.github.com/RWTH-EBC/BUDO>



Abb. 2.3-1: Oberfläche des BF-Tools: Datenfeldbezeichner

eine hintere Position im Schlüssel zu verorten. Der maschinenlesbare Datenschlüssel wird den Eingaben und ausgewählten Kategorien sowie Spezifikationen entsprechend dynamisch aufgebaut. Dabei kann der entstehende Datenschlüssel in drei Teile untergliedert werden. In dem ersten Teil sind maximal fünf der freien Kategorien aufgeführt. Diese sind mit einem Sonderzeichen von dem standardisierten Teil getrennt. Auf den standardisierten Teil folgt erneut ein Sonderzeichen und maximal drei weitere freie Kategorien. Jede Hauptkategorie ist dabei durch einen Unterstrich von einer anderen getrennt. Durch ein Pluszeichen werden Spezifikationen von der Haupt-

kategorie getrennt und das Minuszeichen kennzeichnet die manuelle Eingabe in einem freien Textfeld. Durch die so geschaffenen Optionen wird dem Nutzer ermöglicht, mit einer breiten Variation Datenfelder sowohl aus der Gebäudeautomation als auch aus dem Bereich des reinen Monitorings zu bezeichnen und innerhalb des Datenschlüssels zu verorten. An dieser Stelle sei eine beispielhafte Bezeichnung eines Datenfeldes gegeben:
 B+OFFI+OFFI.TV_R+OFF+MEET-1A___#POW_LIG+LUM___MEA+EN.EL_DO#U+EN+kWh_
 Aufgeschlüsselt enthält dieser Datenschlüssel die Informationen, dass es sich um den Datenpunkt eines

temperierten und belüfteten Bürogebäudes handelt, in dem in dem Besprechungsraum 1A die elektrische Energie der Stromversorgung der Beleuchtung in Kilowattstunden digital gemessen wird. Hierbei wurden, wie an den zusätzlichen Unterstrichen zu erkennen ist, nicht die gesamten Bezeichnungsmöglichkeiten ausgeschöpft. Trotzdem ist bereits eine große Detailtiefe zu erkennen.

Jeder so erzeugte Schlüssel kann in die temporäre Liste hinzugefügt werden. Dabei sind, den Regeln der Datenbank entsprechend, nur einzigartige Schlüssel erlaubt. Die Liste kann in einem weiteren Schritt als .csv exportiert werden, um zur weiteren Verarbeitung genutzt zu werden.

Dieses erste Tool der Toolbox erfüllt demnach bereits zwei der Bedingungen der Datenbank, die Konsistenz und die Zugänglichkeit. Jeder Datenschlüssel kann durch dieselbe Art und Weise ausgelesen werden und ist durch das fixe Vokabular rückverfolgbar. Weiterhin stellt jeder Datenschlüssel eine selbstreflektierende Dokumentation seines Datenfeldes dar, da bereits weitreichende Informationen über die Herkunft des Datenfeldes aus dessen Bezeichnung entnommen werden können.

Das BF-Tool: Datenfeldbezeichner soll neben der Bewahrung der Prinzipien der Datenbank auch Monitoringvorhaben erleichtern, sodass bei der Planung keine eigenen Kennzeichnungssysteme entwickelt werden müssen. Weiterhin ist dieses Tool nicht statisch, sondern anpassungsfähig. Das BUDO-Schema steht in ständiger Entwicklung, sodass in Zukunft auch immer mehr spezielle Fälle für Bezeichnungen abgedeckt und auf die Bedürfnisse der Monitoringdatenbank zugeschnitten werden können.

2.4 BF-Tool: HDF5-Container-Creator

Das BF-Tool: HDF5-Container-Creator adressiert in direktem Maße das Dateiformat der Datenbank und stellt das Bindeglied zwischen den erzeugten konsistenten Datenfeldbezeichnungen und den durch die Projektnehmer aufgenommenen Messdaten dar. Die Funktionen des BF-Tools: HDF5-Container-Creator belaufen sich dabei einerseits auf Vorprüfroutinen zur Sicherstellung der groben Datenqualität und andererseits auf das Erzeugen sowie Erweitern von hdf5-Containern für die weitere Verarbeitung. Die Vorprüfroutinen stellen ein wichtiges Element bei der Erzeugung von Datencontainern dar. Die Forderungen der Monitoringdatenbank nach Einzigartigkeit der Datenfeldbezeichnungen sind dabei ebenso einzuhalten, wie ein definiertes Zahlen- und Zeitstempelformat. Um dies bereits bei der Erstellung sicherzustellen, werden die definierten Vorprüfroutinen bereits mit der Auswahl der umzuwandelnden Ursprungsdatei im .csv-Format automatisch angewendet.

In einem ersten Schritt findet die Prüfung der Datenfeldbezeichner auf Einzigartigkeit statt, sodass sichergestellt ist, dass jedes Datenfeld nur einem einzigen Sensor zugeordnet ist. In einem zweiten Schritt werden die Zeitstempel auf ihr Format überprüft, womit ebenfalls sichergestellt werden soll, dass Zeitstempel nie mehrfach auftreten oder gänzlich fehlen. Es folgt in mehreren Schritten eine Überprüfung der Zahlenwerte auf Unregelmäßigkeiten wie beispielsweise dem Auftreten von NaN-Werten³, fehlenden Zeilen oder Spalten.

Die Ergebnisse dieser Überprüfungsrou­tinen wer­den in einem Logfile dem Nutzer des Tools zur Ver­fügung gestellt, um aufgetretene Fehler an den entsprechenden Stellen zu beheben. Parallel zu der Durchführung der Prüfrou­tinen werden eben­falls Metadaten der Eingangsdatei gesammelt, um später als Attribute in den HDF5-Container einzu­fließen. Die Metadaten von Monitoringdaten sind in diesem Fall Indikatoren für die gewählten Rah­menbedingungen des durchgeführten Monitorings, da bereits anhand der Zeitstempel effektive, also tatsächlich genutzte Abtastraten von Sensoren ab­geleitet werden können. Weiterhin ist die gesamte Monitoringdauer aus den Daten auslesbar, sowie ebenfalls die durchschnittliche Anzahl an Mess­punkten je Zeiteinheit.

Für die Monitoringdatenbank bieten diese Informa­tionen einen großen Mehrwert, sobald in der Nach­nutzung diverse Datensätze miteinander verglichen oder nach definierten Kriterien durchsucht werden sollen. Die so gewonnenen Informationen werden mit der Erstellung des Containers als Attribute der Gruppe mit den enthaltenen Datenfeldern gesi­chert.

Nach der Durchführung der Prüfrou­tinen muss der Nutzer die Förderkennziffer des Projektes angeben, aus dem die umzuwandelnden Monitoringdaten entsprungen sind. Nach Auswahl der Art der Um­wandlung, also der Erzeugung eines neuen Contai­ners oder der Erweiterung eines bestehenden Con­ainers, wird die entsprechende Aufgabe gestartet.

²Ein NaN-Wert bedeutet „Not a Number“ und weist in einem Daten­feld auf Mess- oder Übertragungsfehler der Messdaten hin.

Die Struktur innerhalb eines HDF5-Containers wird durch drei Hauptgruppen innerhalb der Datei gebildet. Diese sind die Rohdaten-, die Aggregierte-Daten- und die Verarbeitete-Daten-Gruppe. Bei der Umwandlung werden Zeitstempel und Datenfelder separiert, sodass ein Zeitstempelvektor und mehrere Datenfeldvektoren entstehen. In der zuvor ausgewählten Gruppe werden dann diese Vektoren als sogenannte Datasets hinterlegt. Jedem Datenfeldvektor wird ein Attribut zugeordnet, welches auf den entsprechenden Zeitstempel verweist. Auf diese Weise können in einer Gruppe durch die Erweiterungsfunktion des Tools auch mehrere Datasets mit unterschiedlichen zeitlichen Verläufen oder unterschiedlichen Abtastraten, zu­sam­mengestellt werden.

Neben der Erstellung der Datasets wird durch das Tool ebenfalls eine Komprimierung der Information vorgenommen. Das Komprimieren verringert den Speicherplatzbedarf des Containers, was für die weitere Verarbeitung in dem BF-Tool: Datenüber­trager von großem Vorteil ist. Die Komprimierung innerhalb der HDF5-Datei erfordert bei einer nach­träglichen Betrachtung des Containerinhaltes keine zusätzliche Leistung. Zur Visualisierung oder zur Sichtung des Inhaltes der erzeugten Container kann der HDF-Viewer⁴ der HDF-Group genutzt werden, welcher frei zur Verfügung steht.

³<https://www.hdfgroup.org/downloads/hdfview/>

2.5 BF-Tool: Datenübertrager

Das BF-Tool: Datenübertrager stellt das letzte Glied in der in der folgenden Abbildung 2.5-1 dargestellten logischen Toolkette der Toolbox dar. Der Datenübertrager bildet dabei die direkte Verbindung zwischen dem Projektnehmer und der zentralen Monitoringdatenbank und ist dadurch direkt für eine erfolgreiche Umsetzung der drei genannten Prinzipien der Datenbank zuständig. Ein Upload bedingt durch das Tool mehrere Dateitypen, welche bestimmte Bedingungen erfüllen müssen.

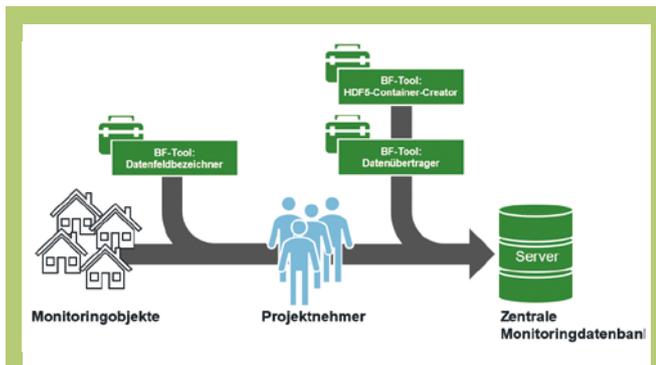


Abb. 2.5-1: Nutzung der Toolbox als logische Toolkette von der Datenaufnahme aus Monitoringobjekten bis zur Datenübertragung auf die Monitoringdatenbank

Monitoringdaten müssen in Form eines HDF5-Containers übertragen werden, welcher entweder durch das BF-Tool: HDF5-Container-Creator aus der Toolbox erzeugt oder anderweitig erstellt wurde. In jedem Fall ist die Vorgabe der Struktur des HDF5-Containers einzuhalten. Neben den Monitoringdaten ist ebenfalls die Dokumentation des Monitorings

in einem gängigen Dateiformat beizufügen. Trotz des hohen Detailgrades der Datenschlüssel ist ein exaktes Bild des vorgenommenen Monitorings nur mit weiteren Informationen zu erhalten. Die Nachnutzung und Vergleichbarkeit, nicht nur von Datenwerten, sondern auch von gesamtheitlichen Verfahren, kann nur durch ausgiebige Informationen, wie Skizzen oder ausführlichen Beschreibungen, sichergestellt werden.

Neben diesen notwendigen Dateien können auch weitere Dateien eines beliebigen Typs für die Übertragung hinzugefügt werden, sofern sie zum Verständnis des Monitorings und der gesammelten Daten beitragen. Nach der Erfüllung der notwendigen Kriterien kann der Nutzer die Übertragung einleiten. Dabei wird eine Verbindung zum Server hergestellt und die Verarbeitung wird gestartet. Das Tool ist für eine risikoarme Übertragung ausgelegt worden, sodass Verbindungsabbrüche keine Verluste bedingen, sondern an der abgebrochenen Stelle wieder begonnen werden kann.

Wie in Abbildung 2.5-2 zu erkennen ist, werden zu diesem Zweck die zu übertragenden Daten in Fragmente von geringer Größe (ca. 1 MB) zerlegt. Jedem dieser Fragmente wird ein Hashwert zugeordnet sodass eine Liste aller Hashwerte aller Fragmente aus diesem Vorgang resultiert. Diese Liste wird in dem ersten Übertragungsschritt dem Server übermittelt, welcher darauffolgend jedes Fragment basierend auf dieser Hashwertliste abfragt. Jedes erfolgreich übertragene Fragment wird serverseitig dokumentiert. Würde es demnach während des Übertragungsvorganges zu einem Abbruch kommen, so würde serverseitig zu jeder Zeit die Information

über sämtliche bereits übertragenen Fragmente vorliegen. Ein gestarteter Upload kann aus diesem Grund immer fortgesetzt werden, bis die entsprechende Hashwertliste abgearbeitet ist und alle Datenfragmente auf dem Server eingegangen sind. Nach Abschluss des Uploads werden die Dateifragmente, ihrem Bauplan entsprechend, serverseitig wieder zusammengesetzt, sodass die Ursprungsdateien wiederhergestellt werden.

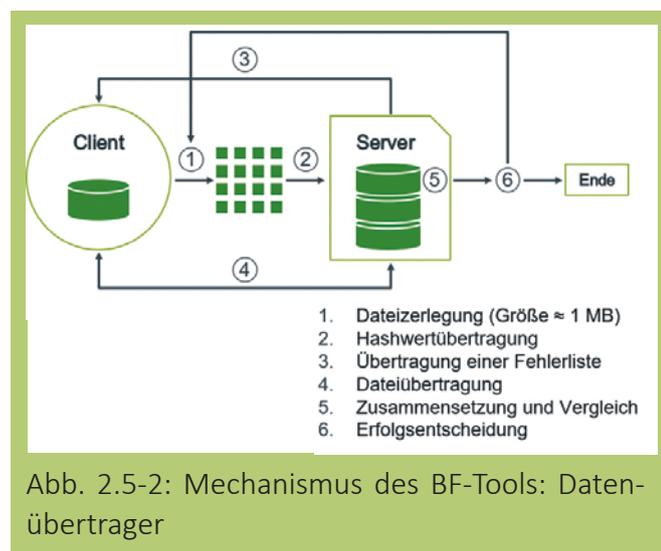


Abb. 2.5-2: Mechanismus des BF-Tools: Datenübertrager

Die Nutzung und Anwendung des Datenübertragers ist an eine Berechtigungsbedingung gebunden, welche in einem späteren Teil näher erläutert wird.

2.6 Ausblick: Zentrale Monitoringdatenbank / Rechtsgutachten

Zu dem Zeitpunkt der Veröffentlichung dieses Buches steht die Toolbox der Begleitforschung unter Umständen den Projektnehmern noch nicht zur

Verfügung. Aus der Konzeptionsphase der Toolbox sowie aus den Arbeiten und Praxiserfahrungen im Konsortium der Begleitforschung mit Bezug zum Monitoring, haben sich Fragestellungen des Datenschutzes ergeben, welche notwendigerweise zu einer Verzögerung der rechtlich abgesicherte Nutzung dieser Tools für alle beteiligten Parteien führte. Zu diesem Zweck wurde ein Rechtsgutachten in Auftrag gegeben, um sich dieser Problematik anzunehmen und eine abgesicherte Datenakquise und Nachnutzung sicherzustellen. Die Hürden für einen abgesicherten Betrieb der Monitoringdatenbank sowie der notwendigen peripheren Tools basieren auf dem Schutz personenbezogener Daten. In der heutigen Zeit der zunehmenden Digitalisierung ist der Datenschutz ein weitreichendes Thema, welches unbedingt adressiert und beachtet werden muss.

In der Energieforschung beginnt eine notwendige Betrachtung des Datenschutzes bereits bei dem Einbau von Sensorik und betrifft im späteren Verlauf auch die Nachnutzung der so gewonnenen Daten. Im Falle der Monitoringdatenbank ist eine Auswirkung des Datenschutzes auf die Nachnutzung, sowie auf alle notwendigen Tools zum Betrieb der Datenbank, unausweichlich. Die Sicherstellung des Schutzes personenbezogener Daten im Wirkkreis der zentralen Monitoringdatenbank muss am Eingang und Ausgang ermöglicht werden. Daher ist jedes Tool der Toolbox sowie die Abfragemechanismen der Datenbank für die Nachnutzung abhängig von diesem Gutachten.

In seiner jetzigen Form sind jegliche Bestandteile der Toolbox sowie die Datenbank selbst funktions-

fähig, jedoch entspricht der funktionale Umfang unter Umständen noch nicht der Forderung des zukünftig veröffentlichten Rechtsgutachtens. Die Bedeutung soll an dieser Stelle in Kürze aufgeschlüsselt werden:

Das BF-Tool: Datenfeldbezeichner zur Datenfeldbezeichnung ermöglicht eine gezielte Anonymisierung von Datensätzen durch die „Schwärzung“, also das Entfernen einzelner beschreibender Vokabeln. Durch das umfangreiche Vokabular des Bezeichnungsschemas könnten allerdings bereits die Namen der Datenfelder kritische Informationen über den Datensatz liefern. Für den Abschluss der Entwicklung muss daher an dieser Stelle eine Bewertung über das Risiko derartiger Informationen angesetzt werden. Das BF-Tool: HDF5-Container-Creator trägt in Form eines erzeugten Datencontainers sämtliche Informationen gebündelt zusammen. Das Auslesen eines Containers ermöglicht somit das Gewinnen von Erkenntnissen über Zusammenhänge von Datenfeldern. Zusammen mit den Informationen aus den Metadaten lassen sich je nach durchgeführtem Monitoring daher auch personenbezogene Werte ableiten.

Die genannten Gegebenheiten gelten in einer ersten Evaluation für den Fall, dass die Nachnutzer dieser Daten beliebige Ziele verfolgen. Für den Ausgang der Datenbank, also das Verteilsystem zur Nachnutzung, ist es daher wichtig, Nutzergruppen zu charakterisieren und Abfragemechanismen zu schaffen, welche auf definierte Berechtigungen zugeschnitten sind. Zu diesem Zeitpunkt konnte bereits festgestellt werden, dass Forscher als Dritte höhere Nutzungsrechte an diesen Datengrundla-

gen erlangen werden als sonstige Interessierte. Eine rechtlich abgesicherte Festlegung der Berechtigungen wird hierbei der Forschungslandschaft von großem Nutzen sein und dem primären Ziel der Datenbank, nämlich der wissenschaftlichen Nachnutzung von Monitoringdaten, dienen.

Die bis zu dem jetzigen Zeitpunkt getätigten Entwicklungen der Software und Konzeption legen den Grundstein für ein funktionierendes Managementsystem zur Nachnutzung von Monitoringdaten. Zusammen mit der Umsetzung der drei Prinzipien Konsistenz, Zugänglichkeit und Dokumentation wird das Rechtsgutachten zu einem robusten Betrieb der Datenbank und der Absicherung aller Beteiligten im Wirkkreis der Datenbank führen. Die Nachnutzbarkeit von Sensordaten durch die Datenbank wird dann nicht nur projektscharf, sondern auch schwerpunktübergreifend einen Mehrwert für viele weitere Forschungsprojekte bieten.

Kontakt:

RWTH Aachen
Lehrstuhl für Energieeffizientes Bauen

Alexander Miehlich, M.Sc.
miehlich@e3d.rwth-aachen.de

Dr.-Ing. Jérôme Frisch
frisch@e3d.rwth-aachen.de

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Christoph van Treeck
treeck@e3d.rwth-aachen.de

03

METAANALYSE ENERGIEWENDEBAUEN



METAANALYSE ENERGIEWENDEBAUEN

3.1 Einleitung

3.2 Wissenschaftlicher Hintergrund

3.3 Methoden zur Datenerfassung

3.4 Methoden zur Datenauswertung

3.5 Ergebnisse

3.6 Evaluation der Methode

3.7 Fazit und Ausblick



Die folgende Metaanalyse stellt die Forschungslandschaft Energiewendebauen umfassend dar. Als Methode für diese Auswertung werden quantitative Umfragen sowie Methoden des Natural Language Processing genutzt. Mittels Textmining extrahierte Schlagworte aus Projektbeschreibungen können in Netzwerkanalysen dargestellt und thematische Schwerpunkte und Abhängigkeiten der EWB-Forschungsthemen quantifiziert und analysiert werden. Die Auswertung der Umfragen zeigt u. a. eine gleichmäßige Verteilung auf eingeführte Projektkategorien. Durch die Netzwerkanalysen wird vor allem ersichtlich, dass die behandelten Forschungsfragen und -methoden der Energiewendebauen-Projekte in den letzten Jahren immer stärker miteinander verknüpft sind.

3.1 Einleitung

Zum Aufbau neuer Förderprogramme und -initiativen durch das BMWi, die Entwicklung neuer Forschungsideen und zur Informationsbereitstellung für die Öffentlichkeit ist es von großem Interesse, eine Übersicht des Forschungsbereichs zu schaffen. Die Wissenschaftliche Begleitforschung (BF) hat sich zum Ziel gesetzt eine systematische, gesamtbilanzielle Auswertung der Forschungstätigkeiten und -trends im Bereich der Förderinitiative Energie in Gebäuden und Quartieren durchzuführen, mit dem Ziel, die erforschten Technologien, verwendeten Methoden und generierten Ergebnisse aufzuzeigen. Im Folgenden wird daher der aktuelle Forschungsstand im Bereich der Gebäude- und Quartiersforschung dargestellt und evaluiert. Zur Schaffung der Datengrundlage wurde ein umfassender und dynamischer Online-Fragebogen entwickelt, welcher in drei Umfragephasen an alle der BF zugeordneten Projekte versandt wurde und folgende Aufgaben erfüllt hat:

- Metaauswertung der Förderinitiative Energie in Gebäuden und Quartieren,
- Dateninput für die Projektlandkarte (siehe Kapitel 01): Projektsteckbriefe, Projektvergleiche, visualisierte Metadaten,
- Datengrundlage für Schwerpunktbetrachtungen und Querschnittsauswertungen,
- Datenerfassung für ein automatisiertes Berichtswesen.

Aufbau und Inhalt des Fragebogens wurden in einem iterativen Prozess bezüglich aller genannten Aufgaben und der Gebrauchstauglichkeit beim Aus-

füllen stetig angepasst und verbessert. Während dieser Phase wurden sowohl die Erfahrungen der befragten Zuwendungsempfänger durch regelmäßige persönliche Befragungen, als auch die Datennutzbarkeit bei der Auswertung durch die Mitglieder der BF eingeholt.

Die zentralen Aspekte der gesamtbilanziellen Auswertung der Förderinitiative sind die Darstellung der aktuellen Forschungsfragen, die verwendeten Methoden zur Beantwortung dieser Fragestellungen sowie das Erkennen von Mustern, Besonderheiten und Schwerpunkten zwischen den analysierten Projekten. Methodisch ergänzt werden die Datensätze des Fragebogens durch semantische Analysen der Textdaten aus der EnArgus-Datenbank [1]. Durch diese kombinierte Datengrundlage können strukturelle Verbindungen der Forschungslandschaft kenntlich gemacht werden.

3.2 Wissenschaftlicher Hintergrund

Im Folgenden werden relevante Arbeiten vorangegangener Begleitforschungen aus dem Gebäude- und Quartiersbereich zu einer gesamtbilanziellen Auswertung des Forschungsbereichs aufgeführt und ein Einblick in den wissenschaftlichen Hintergrund der in dieser Arbeit verwendeten Methoden gegeben. Hierzu gehören zum einen quantitative Befragungen und zum anderen das Textmining. Das BMWi fördert die wissenschaftliche Begleitforschung bereits seit vielen Jahren in unterschiedlichen Ausprägungen. Forschungsprojekte der Initiativen EnBau und EnSan wurden bspw. bereits 2010 durch eine Begleitforschung namens EnOB beglei-

tet und in ihrer Forschungsstruktur analysiert. Voss et al. aggregierten in diesem Rahmen unterschiedliche Vorgehensweisen und Themen der Projekte [2]. Neben *EnOB* haben auch die Begleitforschungen *EnEff:Stadt* und *EnEff:Schule* übergeordnete Untersuchungen durchgeführt, die methodisch und in ihren Ergebnissen jeweils auf ihr Fachthema zugeschnitten sind [3]. Die BF ist 2016 als Projekt zur Vernetzung der Projekte der Förderinitiative Energie in Gebäuden und Quartieren sowie übergreifenden Auswertung der Forschungsergebnisse und-methoden gestartet. Die Anzahl der zugeordneten Projekte ist während der Laufzeit der Begleitforschung auf über 1.200 angestiegen. Bis zu diesem Zeitpunkt hat es in Deutschland keine übergeordnete Analyse und Auswertung einer Forschungsinitiative dieses Umfangs gegeben.

Es gibt verschiedene Methoden der Evaluierung von Forschung und Technologie, welche ihre eigenen Stärken und Schwächen haben und weitreichenden Einfluss auf die gefolgerten politischen Handlungen haben können [4]. Im Zuge der Zukunftsforschung existiert ein großes Methodenportfolio unterschiedlicher Fachdisziplinen wie der Geistes- oder Sozialforschung sowie den Wirtschafts- oder Ingenieurwissenschaften. Häufig wird eine Mischung verschiedener Methoden angewandt [5]. Dies trifft auch auf die hier vorgestellte Metaanalyse zu, welche sowohl quantitative Befragungen als auch Methoden des Textmining verwendet.

3.2.1 Quantitative Befragungen durch Fragebögen

Bei der Erstellung eines Fragebogens ist auf die qualitative und quantitative Übereinstimmung des Instrumentariums mit dem Forschungsziel zu achten. Quantitativ bedeutet in diesem Fall die vollständige und qualitativ die inhaltlich angemessene Konkretisierung der Forschungsfrage. Frageformulierung und Antwortkategorien müssen daher geeignet sein, die Informationen zuverlässig und valide zu erfassen. Darüber hinaus ist zu beobachten, dass mit Zunahme der Spezifikation der Fragenstellungen, die Teilnahmequote sinkt [6]. Onlinebefragungen bieten den Vorteil, dass eine große Probandenmenge erreicht werden kann, da Erstellung und digitale Versendung des Fragebogens zur Datenerhebung ausreichend sind [7] und bspw. keine persönlichen Interviews geführt werden müssen. Außerdem ist eine systematische Abfrage möglich, was eine ebenso systematische Evaluation ermöglicht [4].

Weitere erwartete Vor- und Nachteile eines Fragebogens nach [8] sind in Tabelle 3.2-1 gegenübergestellt.

Ein aktuelles Beispiel, ein Wissenschaftsgebiet mit quantitativen Umfragen zu erfassen, zeigen Betz et al.. Sie befragen Leser der Wissenschaftsjournale *Science*, *Nature* and *Harvard Business Review* über ihre Erwartungen zu den Fortschritten in der Wissenschaft, Technologie und Wirtschaft über einen zukünftigen Zeithorizont von 35 Jahren. Ergänzend werden die Bedürfnisse für technische Produkte und Prognosen über zusammenwachsende Industrien aufgenommen [9]. Andere, wie Claveria et al.

Tabelle 3.2-1: Vor- und Nachteile von Fragebögen als Datenerhebungsverfahren [8]

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> • Geringerer Zeit- und Personalaufwand (v. a. bei großer Probandenmenge) • Befragte können die Fragen besser durchdenken • Merkmale und Verhalten des Interviewers (als mögliche Fehlerquelle) haben in der Regel keinen Einfluss 	<ul style="list-style-type: none"> • Befragungssituation nicht hinreichend kontrollierbar (z. B. Beeinflussung durch andere Personen) • Bei Verständnisproblemen kann keine Hilfe erfolgen • Risiko, dass einzelne Fragen wenig sorgfältig, unvollständig oder nicht ausgefüllt werden

demonstrieren, wie die Methode der Befragungen in der Zukunftsforschung genutzt werden kann. Sie erstellen mit Hilfe von Befragungen einen Index zur Vorhersage zur weiteren Entwicklung von Technologien und gleichen ihn gegen einen realen Technologieindex ab [10].

3.2.2 Textmining und Netzwerkanalyse

Im Rahmen dieser Metaanalyse der BF wird Textmining aus dem Bereich des Natural Language Processing (NLP) als „die Entdeckung neuer, bisher unbekannter Informationen durch Computer, durch automatisches Extrahieren von Informationen aus verschiedenen schriftlichen Ressourcen“ definiert [11]. Eine Vielzahl von Medien (schriftliche Ressourcen) wie Patente, Forschungsberichte, Zitationen oder auch Internetmedien kommen für diese Datenauswertung in Frage [12], [13]. Zur Analyse eines Forschungsumfelds und Sichtbarmachung möglicher Interessensfelder ist die Auswertung großer Datenmengen notwendig, welche durch den Einsatz

von Computertechnologie automatisiert werden kann [14]. Textbasierte Medien bieten bei diesen Analysen einen Mittelweg zwischen quantitativen und qualitativen Technologieerforschungsmethoden, da die Datenerfassung auf einer quantitativen Methode beruht, aber in ihrer Enddarstellung durch Experten qualitativ ausgewertet werden kann [12]. Möckel et al. zeigen, dass verglichen mit Experteninterviews und anderen Umfragemethoden, bibliometrische Analysen, also die Messung wissenschaftlicher Publikationen, das Potential haben bestehendes Wissen „besser“ zu kartieren [5].

In Verbindung mit semantischen Methoden des Textminings zur automatisierten Informationsentnahme (z.B. Schlagwortgenerierung) aus Texten eignen sich Netzwerkanalysen zur ontologischen Analyse, also zur Darstellung der Beziehungen dieser entnommenen Informationen (z. B. inhaltliche Verbindung von Schlagworten). Zur Visualisierung und Verarbeitung dieser Datenmenge wird bei Netzwerkanalysen häufig die Darstellung in einem *Graphen G* gewählt. Dieser hat den Vorteil, dass

er Verbindungen leicht kartieren kann und für den Menschen intuitiv sichtbar macht. Die Begriffe bzw. Wörter der Datenmenge werden zu **Knoten V** zusammengefasst. Die Verbindungen bzw. **Kanten E** zwischen den Knoten entstehen durch inhaltliche Verbindungen zwischen den Begriffen. So haben bei der Nennung von Schlagworten zu einem Thema bspw. häufig gemeinsam genannte Schlagworte eine starke Verbindung und gewinnen an Bedeutung im Graphen. Die Bildung von Kennzahlen ermöglicht schließlich die Bewertung der inhaltlichen Zusammenhänge. Das simpelste Maß eines Graphen ist hierbei der **Grad $d_G(V)$** und wird durch die Menge der an einen Knoten anhängenden Kanten berechnet. Die **Dichte $d(G)$** eines Graphen beschreibt das Verhältnis zwischen der Anzahl der vorhandenen Kanten und der maximal theoretisch möglichen Anzahl von Kanten. Dabei besagt die Dichte, wie viele

der maximal möglichen Kanten im Graphen vorhanden sind. Ein weiterer Kennwert ist die sogenannte **Betweenness Centrality (BC)**, die Aufschluss über die Wichtigkeit eines Knotens für den Informationsfluss zwischen Knoten gibt und somit die Wichtigkeit eines Knotens für das gesamte Netz symbolisieren kann [15]. Abbildung 3.2-1 verdeutlicht das Prinzip der Netzwerkanalyse mittels Graphen.

Textmining bietet eine Grundlage, auf der ein exploratives Technologieforecasting gemacht werden kann [16]. Textbasierte Indikatoren wurden daher bereits in der Vergangenheit genutzt [4] und sind Teil aktueller Untersuchungen [17]. Arbeiten von Kim et al. [12], Zhang et al. [18], Yoon et al. [19], Ma et al. [20] und Li et al. [21] demonstrieren in unterschiedlichen Technologiefeldern den Einsatz von semantischer Analyse und Netzwerkanalysen.

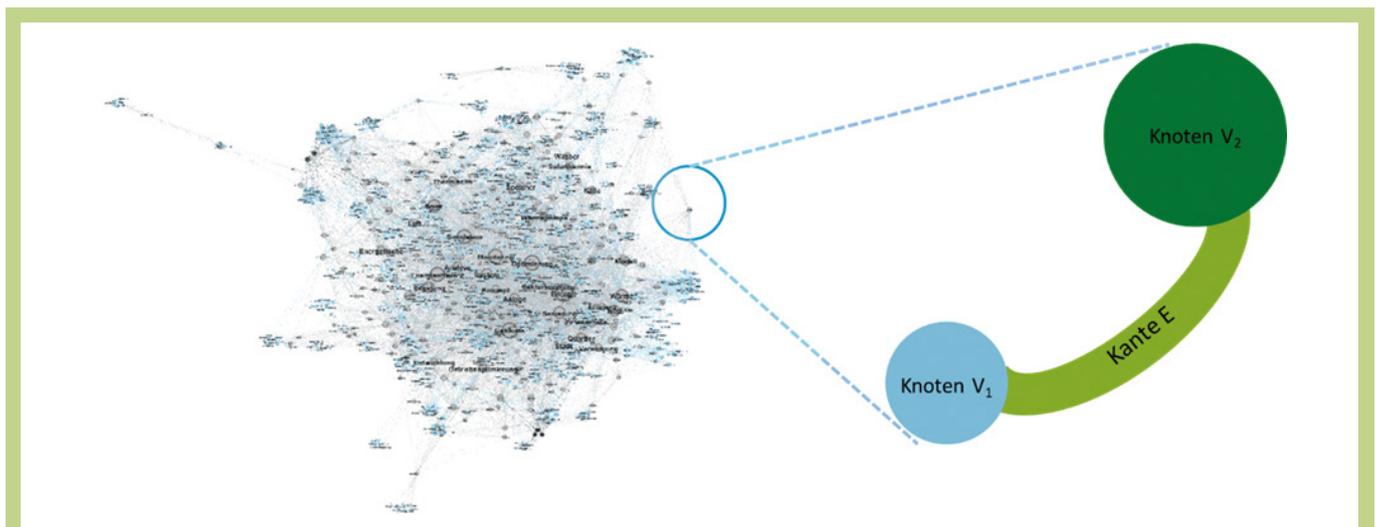


Abb. 3.2-1: Prinzipieller Zusammenhang zwischen Knoten und Kanten in Netzdarstellungen

3.3 Methoden zur Datenerfassung

3.3.1 Quantitative Befragungen

3.3.1.1 Ablauf der Befragungen und Auswahl der Projekte

Um die Forschungslandschaft darstellen zu können, wurde eine Datenerhebung in Form einer Längsschnittstudie mit der Dauer von 3 Jahren ausgeführt. Dazu wurde ein thematisch strukturierter Fragebogen in drei aufeinanderfolgenden Phasen von teilnehmenden Forschungsprojekten beantwortet. Die Ansprache der Projekte erfolgte anhand der durch das BMWi zugeordneten Leistungsplansystematik, welche die Projekte thematisch einteilt. Dadurch wurde sichergestellt, dass die Befragten ein möglichst repräsentatives Bild der Forschungslandschaft Energiewendebauen darstellen und somit später valide Aussagen über die Grundgesamtheit der Forschungslandschaft getroffen werden können. Alle Projekte wurden in jeder Phase angesprochen und zusätzlich nach Projektende. Gleichzeitig wurde der Projektpool mit jeder Umfragephase durch im Befragungszeitraum neu begonnene Projekte stetig erweitert.

Um den in Tabelle 3.2-1 genannten Nachteilen von Fragebögen entgegenzuwirken, konnten die Projekte bei inhaltlichen Verständnis- oder softwaretechnischen Bedienungsproblemen Kontakt zu den Erstellern des Fragebogens aus der BF aufnehmen. Darüber hinaus wurden einzelne Pfade im Fragebogen nur nach Beantwortung einer Bedingungsfrage für die Projekte zugänglich, welche die thematische

Relevanz des Pfades für das Projekt abfragte. Dadurch sollte Sorgfältigkeit und Vollständigkeit bei der Beantwortung forciert werden. Zur Vereinfachung wurden des Weiteren hauptsächlich drei geschlossene Fragentypen verwendet: Single-Choice, Multiple-Choice und numerische Eingaben. Offene Fragen wurden nur dort verwendet, wo Projekten Raum für Beschreibungen ihrer Forschungstätigkeit gegeben werden sollte.

3.3.1.2 Erstellung der Umfrage

Die Erstellung des Fragebogens wurde mittels der Open Source Plattform LimeSurvey durchgeführt. Diese stellt ein Frontend für den Entwurf von Fragebögen zur Verfügung. Sowohl die Daten der Fragen als auch eingetragene Antworten werden dabei in einer SQL Datenbank gespeichert. Darüber hinaus wurde für eine vereinfachte Auswertung ein eigenes Webtool entwickelt.

Befragte wurden mit Hilfe des Frameworks von LimeSurvey durch diverse Unterkategorien geführt. Dadurch erzeugt jedes Projekt seinen eigenen Pfad durch den Fragebogen und wird in der Datenabfrage nur auf notwendige Fragen geleitet. Aus den Themen der vergangenen Begleitforschungen sowie einer Analyse von Projektkurzberichten wurden folgende Kategorien für die Struktur des Fragebogens ausgewählt:

- Allgemeine Projektinformationen,
- Methoden & Konzepte,
- Digitale Werkzeuge,
- Technologien (unterteilt in Bautechnik und Anlagentechnik),

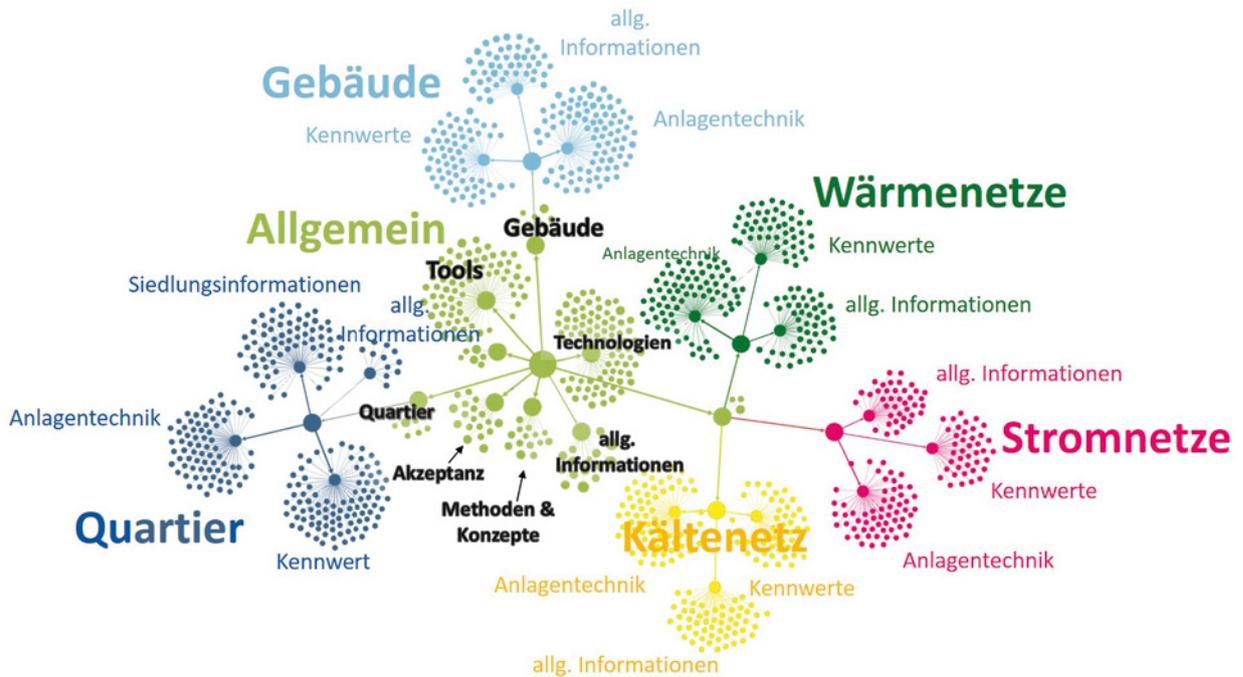


Abb. 3.3-1: Struktur des Fragebogens

- Gebäude (Allgemeine Informationen, Anlagentechnik, Kennwerte),
- Quartiere (Allgemeine Informationen, Anlagentechnik, Kennwerte),
- Versorgungsnetze,
 - Wärmenetze (Allgemeine Informationen, Anlagentechnik, Kennwerte),
 - Kältenetze (Allgemeine Informationen, Anlagentechnik, Kennwerte),
 - Stromnetze (Allgemeine Informationen, Anlagentechnik, Kennwerte),
- Akzeptanzforschung.

Abbildung 3.3-1 zeigt eine Visualisierung der Fragebogenstruktur, wobei jeder Punkt eine Frage symbolisiert.

Um die eingangs erwähnten Aufgaben des Fragebogens erfüllen zu können, muss ein weites Datenspektrum abgefragt werden. Daher wurde eine vergleichsweise hohe Fragenanzahl erzeugt, die in ihrer Spezifikation im Verlauf des Fragebogens immer präziser wird. Der entstandene Fragebogen ist daher als Kompromiss für alle diese Aufgaben zu sehen und nicht als Zuschnitt auf einen Bereich oder eine Forschungsfrage.

3.3.2 Semantische Analyse mittels Textmining

Datengrundlage für eine Netzwerkauswertung ist eine ausreichend große Begriffsmenge mit inhaltlichen Verbindungen. Die Generierung dieser Datengrundlage ist zweigeteilt:

1. Schlagworteintragung: Die befragten Projekte trugen zu Beginn der quantitativen Befragungen zehn Schlagworte in den Fragebogen ein, die das eigene Projekt bestmöglich beschreiben.
2. Semantische Analyse: Mittels Textmining-Algorithmus wurden zusätzlich aus der, für jedes Projekt in der EnArgus-Datenbank hinterlegten Projektbeschreibung, Schlagworte automatisiert extrahiert.

Zum einen besteht dadurch die Möglichkeit des Abgleichs dieser beiden Datenerfassungsmethoden und zum anderen wird es möglich, auch für Projekte, die nicht an den Befragungen teilgenommen haben, Schlagworte zu generieren. Es bietet sich daher die Möglichkeit, die gesamte Forschungslandschaft abzudecken.

Für die Extraktion der Schlagworte aus den Beschreibungen wird der Algorithmus *TextRank* von Mihalcea und Tarau genutzt. Hierbei handelt es sich um einen Algorithmus, der einen Text in seine Textbausteine bzw. Wörter aufteilt und diese gewichtet. Durch *TextRank* werden vorher ausgewählte Wörter wie Stoppwörter (z. B. Artikel, Konjunktionen, Präpositionen) oder bestimmte Wortarten entfernt, sowie der restliche Text syntaktisch aufbereitet. Eine Art rollierendes Fenster mit der Größe einer festgeschriebenen *Wortmenge* n analysiert den Text. Durch dieses Fenster wird neben der Position im

Satz auch die Beziehung zu den direkt benachbarten Worten in der Auswertung beachtet. Vorteile des Algorithmus sind zum einen seine gute Trefferquote bei der Betrachtung von Nomen und Adjektiven [22]. Zum anderen ist er auf einen beliebig großen Datensatz anwendbar [23]. Eine große Herausforderung für die Sprachverarbeitung stellt die deutsche Sprache dar. Vor allem bei der Schlagwortfindung müssen Wörter mit exakt gleicher Formulierung gefunden werden, was aufgrund der deutschen Grammatik nicht immer der Fall ist. Für die Angleichung von gefundenen Schlagwörtern wird häufig ein *Stemming* (Stammformreduktion) benutzt. Da dies auf Grund der hohen Anzahl der Fachbegriffe in den EnArgus-Beschreibungen nicht zu dem gewünschten Ergebnis führt, wird eine analoge Bearbeitung der Schlagworte angewendet. In der Vorbereitung des Textes wird außerdem noch ein *Part of Speech Tagging* ausgeführt, welches dem Computer ermöglicht, Wörtern ihrer Wortart zuzuordnen. Dies ermöglicht *TextRank* die Wortkandidaten nach ihrer Art auszuwählen, z. B. nur Nomen und Adjektive. Für einen Abgleich zur Schlagwortextraktion mit TextRank wird zusätzlich eine *Unschärfe Suche* (*Fuzzy Search*) eingesetzt. Hierzu werden in den Fragebogen eingetragene Schlagworte mit den Beschreibungen aus EnArgus gegen gewertet. Im Detail werden bei diesem Vorgehen die eingetragenen Schlagworte mit den Wörtern aus den EnArgus-Beschreibungen abgeglichen und Worte mit hoher Ähnlichkeit ebenfalls zu Schlagworten kategorisiert. Hierdurch kann dem Auftreten von Wortkompositionen, die gerade bei Fachbegriffen häufig auftritt, entgegengewirkt werden.

Martino et al. [14] und Yoon et al. [19] heben bei ihren Schlagwortextraktionen aus Fachtexten den Punkt heraus, dass zwischen Wörtern mit trivialer und wichtiger Bedeutung unterschieden werden muss. Cunningham stellt fest, dass Schlagworte mit hoher Anzahl auftreten können, jedoch weniger Mehrwehrt bieten, da sie nicht ausreichend scharf in ihrer Formulierung sind. Entgegengesetzt dazu existieren Schlagworte mit sehr hoher Präzision aber geringer Anzahl. Der wertvollste Schlagwortsatz liegt zwischen diesen beiden Extrema [24]. Dieser Grundsatz wird auch in der Methodik dieser Arbeit beachtet. Die hervorgehenden Schlagworte werden von Experten validiert und fließen in eine ontologische Analyse zur Kategorisierung der Projekte und Analyse ihrer inhaltlichen Verbindungen untereinander.

3.4 Methode zur Datenauswertung

Im Vorfeld der Datenauswertung werden Eingaben der Projekte nach bewährten Verfahren auf Plausibilität geprüft. Hierzu gehören automatisierte (z. B. Prüfung numerischer Werte innerhalb realistischer Spannweiten) und manuelle Vorgehensweisen während der Beantwortungsphase in LimeSurvey und im Anschluss an diese. Fehlerhafte Daten werden aus Gründen der Dokumentation im Datensatz belassen, aber nicht in die Auswertungen einbezogen. Die Auswertung der Daten aus den Umfragerunden geschieht maßgeblich in den einleitend genannten Tiefenbohrungen und Querauswertungen, daher werden im Rahmen dieser Arbeit die übergreifend eingetragenen Informationen der quantitativen

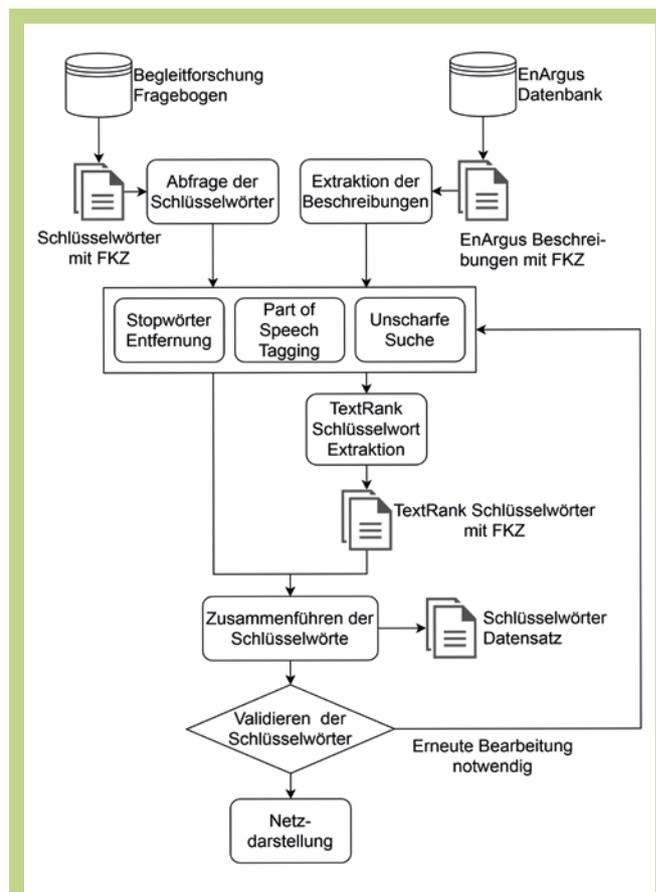


Abb. 3.4-1: Flussdiagramm der vorgestellten Methode

Auswertung (z. B. Zugehörigkeit zur Förderinitiative) näher beleuchtet. Darüber hinaus wird eine Methodevaluierung des Fragebogens vorgenommen. Hierzu zählt unter anderem die Analyse der Teilnahmeintensität über die drei Phasen hinweg und innerhalb der Fragebogenkategorien.

Die mittels quantitativen Umfragen und semantischen Analysen gewonnenen Schlagworte werden mittels einer Netzwerkanalyse einer ontologischen

Auswertung unterzogen. Dabei bilden die Schlagworte die Knoten des Graphen und die Kanten werden durch das gemeinsame Auftreten der Schlagworte im jeweiligen Projekt erzeugt. Es entsteht ein visuelles Netz der Verkettung zwischen den Schlagworten, welches den inhaltlichen Zusammenhang der Projekte verdeutlichen soll. Die Visualisierung und anschließende Bewertung der Graphen geschieht mittels Python in Kombination mit dem Visualisierungstool Gephi. Hierbei handelt es sich um eine Open Source Software von Bastian et al., die auf die visuelle Erstellung von Graphen spezialisiert ist [25]. Zur Bewertung schließt sich die Berechnung des Grads ausgewählter Kanten und Dichte des Graphen an. Die Schlüsselwörter mit hohem Grad und Dichte werden ausgewertet. Zusätzlich wird *BC* als Kenngröße hinzugezogen. Eine Übersicht der gesamten Methode zeigt Abbildung 3.4-1.

3.5 Ergebnisse

Das folgende Kapitel stellt die Ergebnisse der Auswertung der quantitativen Befragungen und der kombinierten semantischen und ontologischen Analysen mittels Textmining und Netzwerkanalysen vor.

3.5.1 Quantitative Befragung

Im Weiteren werden Auswertungen der quantitativen Befragungen vorgestellt, die einen direkten Mehrwert für die Gesamtdarstellung der Förderinitiative und deren Projekte haben. Ausgeschlossen sind daher sehr spezifische Fragen, die auf andere Aufgaben (siehe Einleitung) des Fragebogens ab-

zielen. Detailauswertungen zu den einzelnen Kategorien finden sich im Rahmen dieses Buches in den Kapiteln 04 (Methoden & Konzepte), 05 (Gebäude), 06 (Quartiere), 07 (Versorgungsnetze), 08 (neue Technologien) und 09 (Digitale Werkzeuge). Ergänzend sind im Folgenden die Ergebnisse der zweiten und dritten Phase dargestellt, da die erste Phase als Testphase diente und sich daher inhaltlich sowie strukturell deutlich von den anderen Phasen unterscheidet. Die Auswertung beinhaltet sowohl Einzelfragen als auch Kombinationen dieser.

3.5.1.1 Projektkategorien und Förderinitiativen

Abbildung 3.5-1 a und b zeigen die Aufteilung der Projekte auf die eingangs genannten Kategorien, wobei eine Mehrfachzuordnung möglich ist. Diese Zuordnung geschieht indirekt durch die Befragung. Das bedeutet, dass die Teilnehmer nicht selbst die Kategorie ihres Projekts auswählen, sondern diese Zuordnung bei der Auswertung auf Grundlage bestimmter Bedingungsfragen innerhalb der Umfrage geschieht. Hierdurch wird eine objektive Zuordnung angestrebt. Insgesamt ist eine weitestgehend gleichmäßige Verteilung auf die Kategorien zu erkennen. Quartiersprojekte haben mit 5 % den geringsten Anteil, Projekte im Bereich Methoden & Konzepte treten mit 22 % am häufigsten auf. Beim Vergleich zwischen den Befragungsphasen, die ca. ein Jahr auseinanderliegen, zeigen sich nur geringfügige Unterschiede bzw. Entwicklungen. Dieser Auswertung liegen 691 Antworten von 257 Projekten in Phase 2 und 746 Antworten von 254 Projekten in Phase 3 zu Grunde.

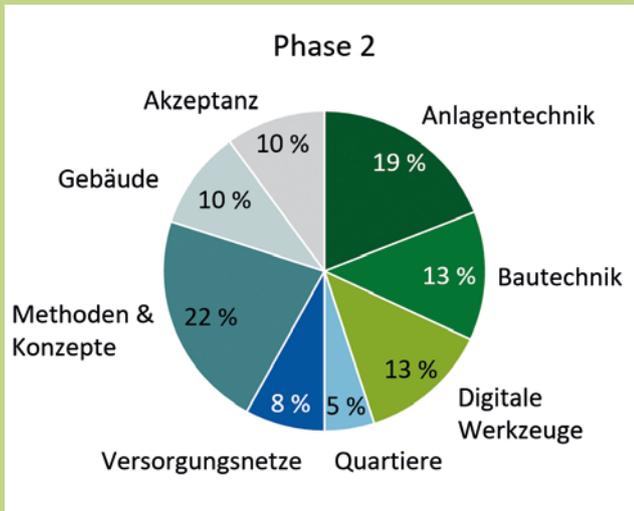


Abb. 3.5-1a: Kategorische Einteilung der Projekte in den Befragungsphasen 2 (Mehrfachauswahl)

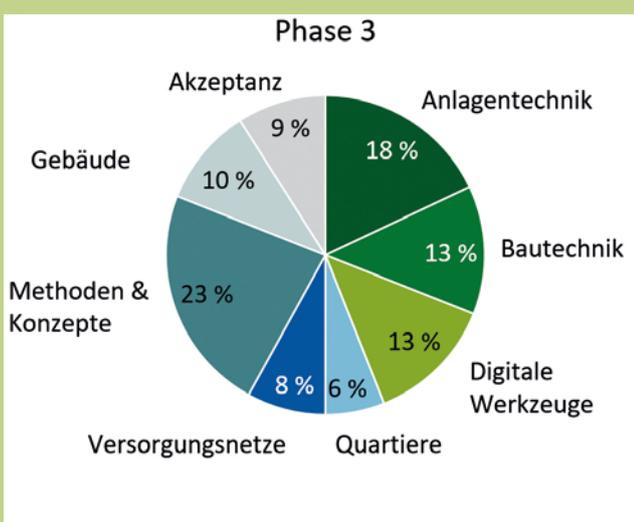


Abb. 3.5-1b: Kategorische Einteilung der Projekte in den Befragungsphasen 3 (Mehrfachauswahl)

Abbildung 3.5-2 zeigt, wie häufig Kategorien durch die Mehrfachzuordnung innerhalb eines Projekts gemeinsam auftreten. Hierbei gibt das Farbspektrum die Anzahl gemeinsamer Nennungen an. Es zeigt sich, dass EWB-Forschungsprojekte häufig nicht nur einer Kategorie zugeordnet werden können, sondern Fragestellungen verschiedener Bereiche innerhalb eines Projekts betrachtet werden. Es ergibt sich eine homogene Verteilung auf die Kategorien, wobei Methoden & Konzepte besonders häufig mit Anlagentechnik und Digitalen Werkzeugen auftreten. Dies lässt auf einen hohen Anteil methodischer Fragestellungen schließen.

Darüber hinaus zeigt sich, dass Projekte bei der Zuordnung zu nur einer Kategorie fast ausschließ-

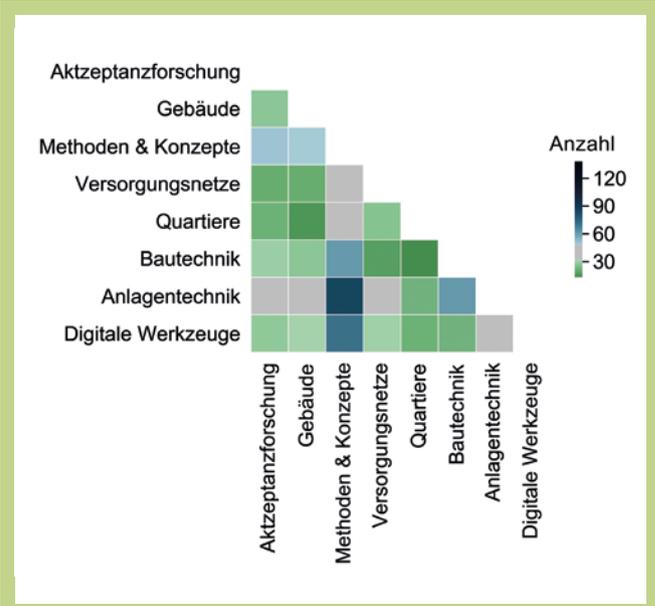


Abb. 3.5-2: Häufigkeit gemeinsamer Kategoriezuordnungen

lich in den Kategorien Methoden & Konzepte und Technologiekategorien (Anlagentechnik und Bautechnik) zu finden sind.

Die Projekte können ebenfalls ihrer entsprechenden Förderinitiative zugeordnet werden, was zu Beginn jedes Projekts vor dem Hintergrund des übergeordneten Forschungsschwerpunkts geschieht. Die Antworten von 260 Projekten (Phase 2) bzw. 255 Projekten (Phase 3) bzgl. dieser Zuordnung stellt Abbildung 3.5-3 dar. Es zeigen sich acht bzw. sieben unterschiedliche Initiativen in den jeweiligen Phasen, wobei *Energieoptimiertes Bauen (EnOB)* in beiden Fällen mit ca. 40 % den größten Anteil einnimmt, gefolgt von *EnEff:Stadt* und *EnEff:Wärme*. Über die beiden Phasen hinweg fällt der Anstieg der *EnEff:Gebäude.2050*-Projekte auf. Diese Veränderung ist auf die erstmalige Beantragungsmöglichkeit zwischen März 2016 Dezember 2018 zurückzuführen. Abbildung 3.5-4 zeigt die Kategorie- und Förderinitiativenzuordnung im Vergleich. Zu erkennen ist, dass sich die Kategorien bei *EnEff:Stadt*, *EnEff:Wärme*, *EnEff:Gebäude.2050* und *Solares Bauen/ Energieeffiziente Stadt* relativ gleichmäßig aufteilen. In den Initiativen *EnOB* und *Thermische Energiespeicher* steht die Kategorie Methoden & Konzepte im Vordergrund, jeweils gefolgt von Anlagentechnik. Digitale Werkzeuge, Bautechnik und Methoden & Konzepte sind bestimmend für die Initiative *Niedertemperatur-Solarthermie*.

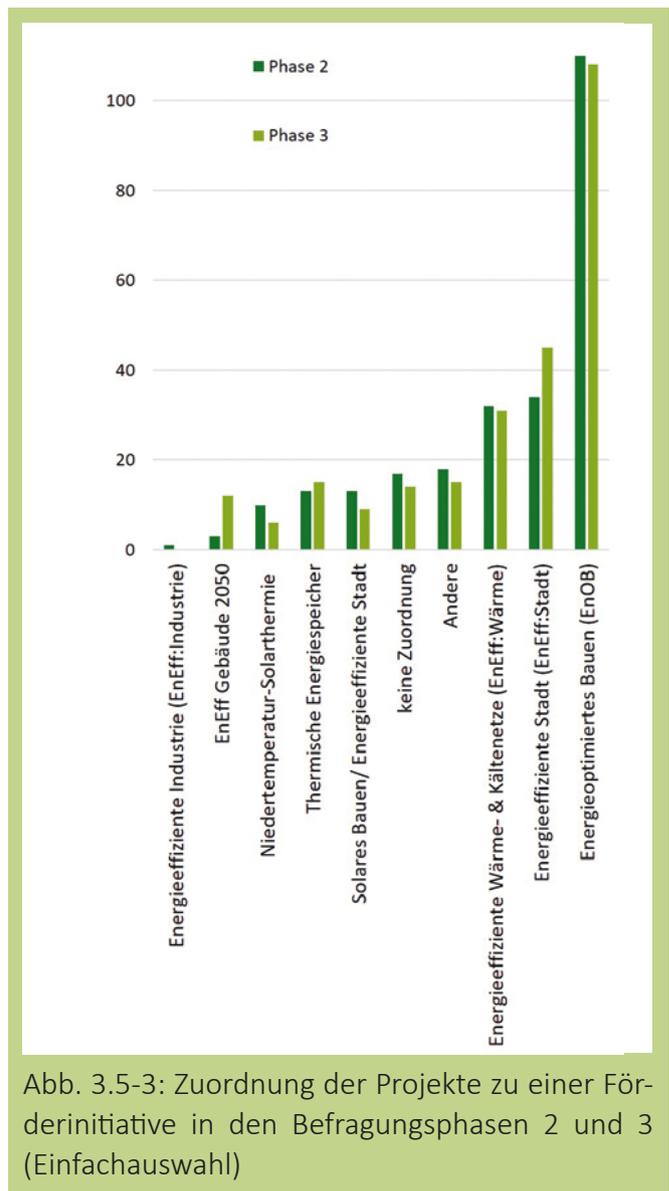


Abb. 3.5-3: Zuordnung der Projekte zu einer Förderinitiative in den Befragungsphasen 2 und 3 (Einfachauswahl)

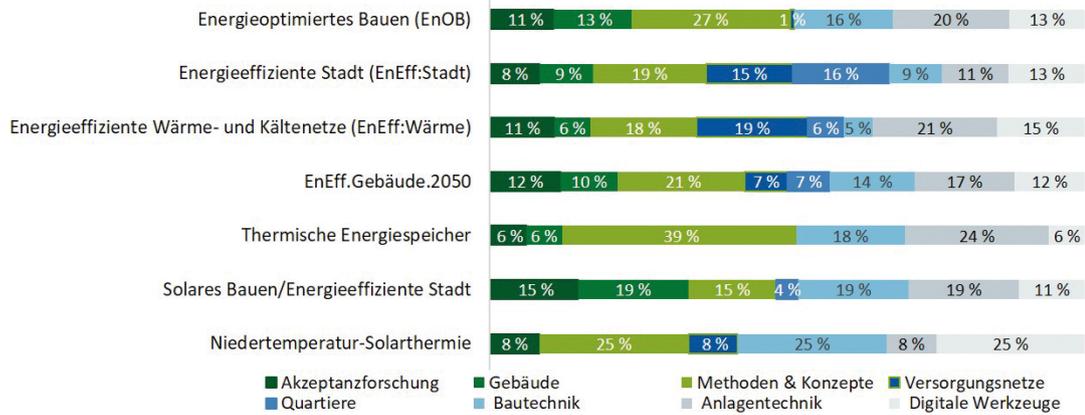


Abb. 3.5-4: Vergleich der Kategorie- und Förderinitiativenzuordnung

3.5.1.2 Projekttypen und -aktivitäten

Über die grobe Projekteinteilung in Kategorien wird eine tiefergehende Einteilung in Projekttypen und -aktivitäten vorgenommen. Je nach Projektkategorie fällt diese Einteilung unterschiedlich aus, und ist in Abbildung 3.5-5 für die Kategorien Gebäude und Quartiere für Befragungsphase 3 zusammengefasst. Die dargestellten Projekte betrachten ein reales Gebäude, einen Gebäudekomplex oder ein Quartier als Forschungsgegenstand. Etwa die Hälfte der Projekte, die Gebäude betrachtet haben, geben an, dass sie nur ein einziges Gebäude betrachten. Fast ein Viertel betrachtet zwei Gebäude und die restlichen Projekte betrachten drei oder mehr Gebäudeobjekte.

Zu erkennen ist, dass Demonstrationsvorhaben nur in Gebäuden stattfinden und Netzausbau nur in Quartieren. Dies ist jeweils dem Umstand geschuldet, dass dieser Projekttyp per Definition nur in Gebäuden bzw. Quartieren vorkommt. Im Quartiersbe-

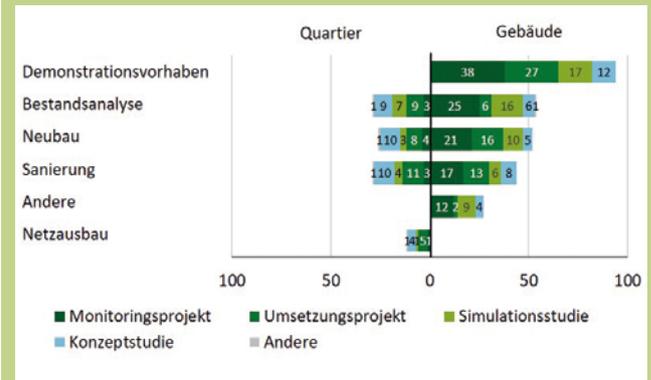


Abb. 3.5-5: Projekttypen und -aktivitäten in Gebäude- und Quartiersprojekten in Befragungsphase 3 (Mehrfachauswahl)

reich zeigt sich eine gleichmäßige Aufteilung auf alle Aktivitäten. Für Gebäude stellen Demonstrationsvorhaben den größten Teil, während die weiteren Aktivitäten gleichmäßig verteilt sind. Bezüglich der Projekttypen zeigt sich im Gebäudebereich eine Mehrheit an Monitoringprojekten, die bei den Quartiersprojekten die geringste Anzahl ausmacht. Quar-

tiere werden durch die zunehmende systemische Vernetzung immer wichtiger in der Betrachtung. Im Zeitraum der Begleitforschung sind insgesamt 127 Quartiere der Forschungslandschaft EWB zugeordnet, deren Projekte hauptsächlich aus *EnEff:Stadt* stammen. Dabei liegt ein großer Fokus auf Konzeptstudien, in welchen die Machbarkeit einer Methode untersucht und demonstriert wird.

Insgesamt ist der Bestands- dem Neubaubereich zahlenmäßig überlegen, da Bestandsanalysen und Sanierung beide in bestehenden Gebäuden stattfinden. Gebäudebetrachtungen finden vermehrt im Nichtwohnbereich statt. Häufig wird dort der Einsatz unterschiedlicher Technologien untersucht. Diverse Projekte beinhalten Sanierungen von Einzelgebäuden oder begleiten solche mit einem Monitoring. Auch wenn die Gesamtzahl der Nichtwohngebäudeprojekte hoch ist, beschränken sich die Gebäudetypen zu einem Großteil auf Institute, Lehrgebäude, Gebäude aus der Verwaltung oder Schulen.

Einen Einblick in die untersuchten Technologien der Forschungsprojekte aus den Kategorien Gebäude und Quartiere gibt Abbildung 3.5-6. Die Einteilung erfolgt in Wohn- und Nichtwohngebäude sowie Quartiere auf der rechten Seite und in Neubau- und Sanierungsvorhaben auf der linken Seite. Es zeigt sich das Erzeuger- und Speichersysteme in den meisten Projekten betrachtet werden. Eine Mehrheit kann in der Betrachtung von Neubauten sowie Wohn- und Nichtwohngebäuden verortet werden. Kälteerzeuger bilden hier eine Ausnahme, da sie vermehrt in bestehenden Gebäuden untersucht werden und auf Grund der seltenen Verwendung im Wohnbereich bei Nichtwohngebäuden im Vordergrund stehen.

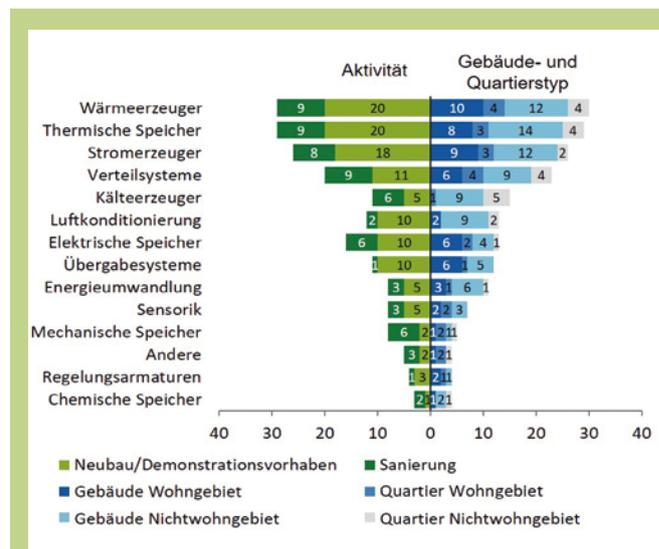


Abb. 3.5-6: Technologieverwendung in unterschiedlichen Projekt- und Gebäudetypen

26 % der Projekte, die an den Umfragen teilgenommen haben, beschäftigen sich mit dem Gebiet der Akzeptanzforschung oder einem verwandten Thema. Dies sind z. B. Projekte, die Laborexperimente oder Feldversuche durchführen, in denen Probanden mit eingeschlossen sind. In einigen Umsetzungs- und Demonstrationsprojekten in Gebäuden und Quartieren spielt dieses Thema eine immergrößere Rolle (siehe Kapitel 10 Dokumentation von PL-Treffen in Essen, Detmold und München). In diesem Themenfeld werden in den Umfragen u. a. nicht-technische Hemmnisse der Projekte abgefragt. 105 (Phase 2) bzw. 198 Projekte (Phase 3) haben hier 163 bzw. 295 Antworten eingetragen. Das heterogene Ergebnis zeigt Abbildung 3.5-7. Fehlendes Wissen beim Endverbraucher ist mit leichtem Abstand meist genannt, jedoch ergibt sich

3.5.2 Textmining und Netzwerkanalysen

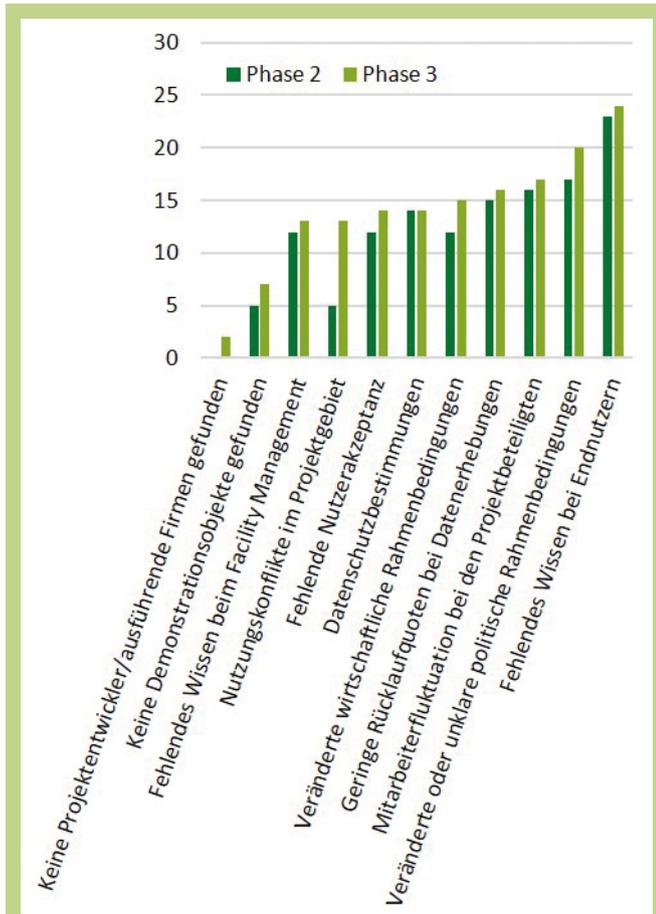


Abb. 3.5-7: Nicht-technische Hemmnisse der Projekte in den Befragungsphasen 2 und 3, die den Verlauf oder den Erfolg des Projekts beeinträchtigt haben (Mehrfachauswahl)

eine gleichmäßige Verteilung auf fast alle Aspekte, sodass die Probleme hier sehr unterschiedlich und vielschichtig gelagert sind.

Die semantische Analyse und Schlagwortextraktion der EnArgus-Projektbeschreibungen mittels Textmining in Kombination mit den eingetragenen Schlagworten der Projekte macht ontologische Auswertungen durch Netzwerkanalysen möglich, welche in diesem Abschnitt vorgestellt werden.

Mit Hilfe der Analyse der Knoten des Netzwerks kann festgestellt werden, wie sich das Forschungsgebiet thematisch aufteilt. Ein Netz wird durch eine physikalische Simulation von Kräften dargestellt. Knoten stoßen sich ab, während die Verbindung zwischen den Knoten für Anziehung sorgen und somit ein Netz kreieren. Knoten mit einer hohen Anzahl Verbindungen stellen themenspezifische Schwerpunkte dar. Abbildung 3.5-8 zeigt das Netz für die gesamte Forschungslandschaft EWB (a) und (b) das gröber aufgelöste Netz der stärksten Knoten und Verbindungen. Die Größe eines Wortes gibt hierbei die Häufigkeit an und die Entfernung der Wörter untereinander symbolisiert deren thematische Verbundenheit.

In der Darstellung werden die Schwerpunkte sichtbar, die die Forschungsprojekte bei ihrer wörtlichen Beschreibung im gesamten Datensatz gemacht haben. Die im Energieforschungsprogramm des BMWi geforderte Fokussierung auf Gebäude, Quartiere und Energieeffizienz [26] ist durch die Stärke der Knoten zu beobachten. Des Weiteren wird ein starker Fokus auf Wärme und Sanierung gelegt, was auf den Themenschwerpunkt Wärmewende des BMWi hinweist. Methodisch stehen bei den Projekten Simulations- und Optimierungsmethoden sowie das

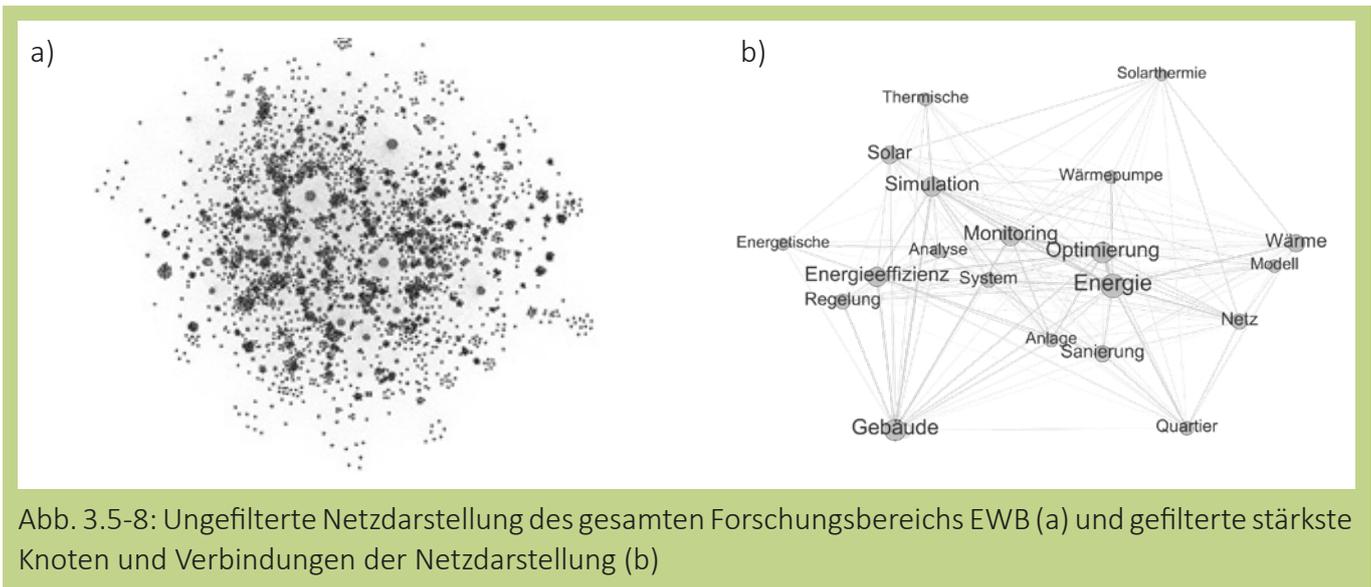


Abb. 3.5-8: Ungefilterte Netzdarstellung des gesamten Forschungsbereichs EWB (a) und gefilterte stärkste Knoten und Verbindungen der Netzdarstellung (b)

Monitoring im Vordergrund. Die geringe Entfernung dieser Begriffe im Netz kann auf eine häufige gemeinsame Verwendung dieser Methoden hinweisen.

Mit der Betrachtung der Knoten mit den meisten Verbindungen kann eine grobe Übersicht über die behandelten Themenfelder in EWB durchgeführt werden. Sollen detailliert Themengebiete betrachtet werden, wird die Netzdarstellung schnell unübersichtlich und Cluster sind weniger gut zu erkennen. Eine mögliche Schlussfolgerung daraus könnte sein, dass die Themengebiete in EWB stark voneinander abhängen oder aufeinander aufbauen. Die Trennung des Netzes in Unternetze ist damit deutlich erschwert. Dieser Umstand kann durch Berechnung der Graphen-Dichte sichtbar gemacht werden. Werden die Projektkategorien der quantitativen Umfrage den Schlagworten zugeordnet, lässt sich ein Kennwert für die Vielfalt im Graphen

erzeugen, indem der Graph nach seinen Kategorien eingeteilt und die entstehenden Teilnetze bewertet werden. Für dieses Teilnetz einer Kategorie lässt sich der mittlere Grad und die Kantendichte berechnen und mit dem Gesamtgraph und anderen Teilnetzen abgleichen. Aus dem Grad kann die Relevanz einer Kategorie abgeleitet werden und aus der Dichte der Kanten lässt sich schließen, wie stark die Knoten der Teilnetze miteinander verwoben sind bzw. wie viele der tatsächlich möglichen Verbindungen zwischen den Knoten möglich sind. Je näher der Wert an 0 liegt, desto geringer vernetzt sind die Knoten. Abbildung 3.5-9 zeigt die Ergebnisse der beschriebenen Analyse. Auffällig ist, dass die Kennwerte sich kaum über beide Phasen unterscheiden.

Der mittlere Grad aller Kategorieilnetze verläuft bei einem Wert von ca. 20, was die Existenz von gleichmäßig relevanten Themen in den Kategorien widerspiegelt. Die Ausschläge der Kantendichte für

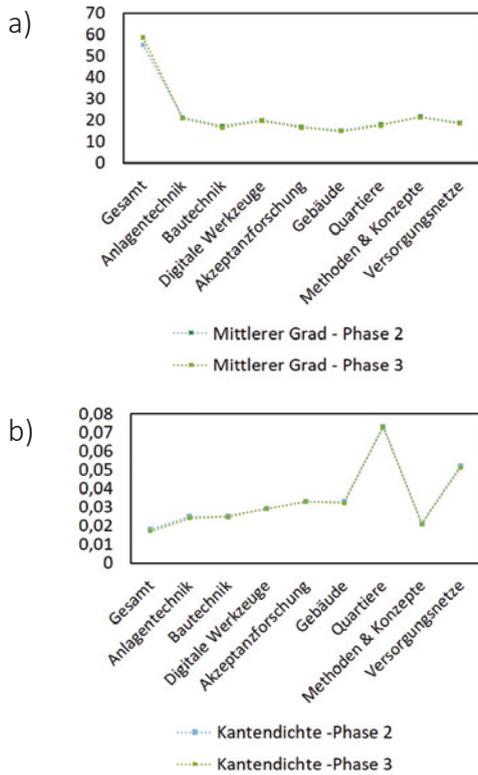


Abb. 3.5-9: Mittlerer Grad (a) und Kantendichte der kategorischen Graphen (b)

Quartiere und Versorgungsnetze zeigt die stärkere Vernetzung dieser beiden Themengebiete. Viele Gemeinsamkeiten und stark aufeinander aufbauende Themen können die Ursache hierfür sein. Im Gegensatz dazu ist der Graph um das gesamte Themengebiet (Gesamt) weniger dicht und umfasst mehr diverse Themengebiete. Dafür ist die Anzahl der Verbindungen und somit auch der Grad der jeweiligen Knoten im Schnitt höher.

Tabelle 3.5-2: Kennzahlen der gefilterten Kennwörter der Quartiersprojekte

Schlagwort	Betweenness Centrality		Grad	
	Rang	Wert	Rang	Wert
Quartier	1	18.047,44	1	208
Gebäudesimulation	2	7.057,09	20	52
Smart	3	5.860,73	4	86
regenerativ	4	5.686,82	6	76
Sektorkopplung	5	5.556,74	3	102
Wärmenetz	6	3.714,49	7	76
Stadt	7	3.643,00	2	108
Vernetzung	8	3.595,39	5	82
Energieeffizienz	9	2.352,46	12	62
Simulation	10	2.319,85	26	50
Wärmewende	11	2.290,73	>20	52
Gebäudehülle	12	2.180,00	>20	20
Erneuerbare Energien	13	1.835,86	9	52
Energiespeicher	14	1.524,18	16	56
Wärmepumpe	15	1.300,63	17	56

Werden Schlagwörter nach ihrer Relevanz gefiltert, entsteht ein übersichtliches und interpretierbares Netz. Neben dem Grad ist die eingangs erwähnte BC eine bewährte Kenngröße, um die Relevanz eines Knotens innerhalb eines Graphen zu bewerten. Sie soll Aufschluss über Knoten geben, die zentral zu anderen Knoten liegen und demnach auch zentrale Inhalte des gesamten Graphen darstellen. Tabelle 3.5-2 zeigt die 15 Schlagwörter mit dem höchsten Wert für die BC und den zugehörigen Wert des Grads für das Teilnetz der Kategorie Quartiere. Es zeigen sich teils deutliche Unterschiede zwischen den beiden Kennwerten, was z. B. anhand von *Gebäudesimulation* oder *Wärmewende* deutlich wird. Diese weisen einen hohen BC-Wert auf, aber geringen Wert für ihren Grad. Schlagwörter wie *Sektorkopplung*, *Vernetzung* oder *Stadt* zeigen, dass vernetzende Themen bei Quartieren im Vordergrund stehen. Des Weiteren ist ein thematischer Fokus die

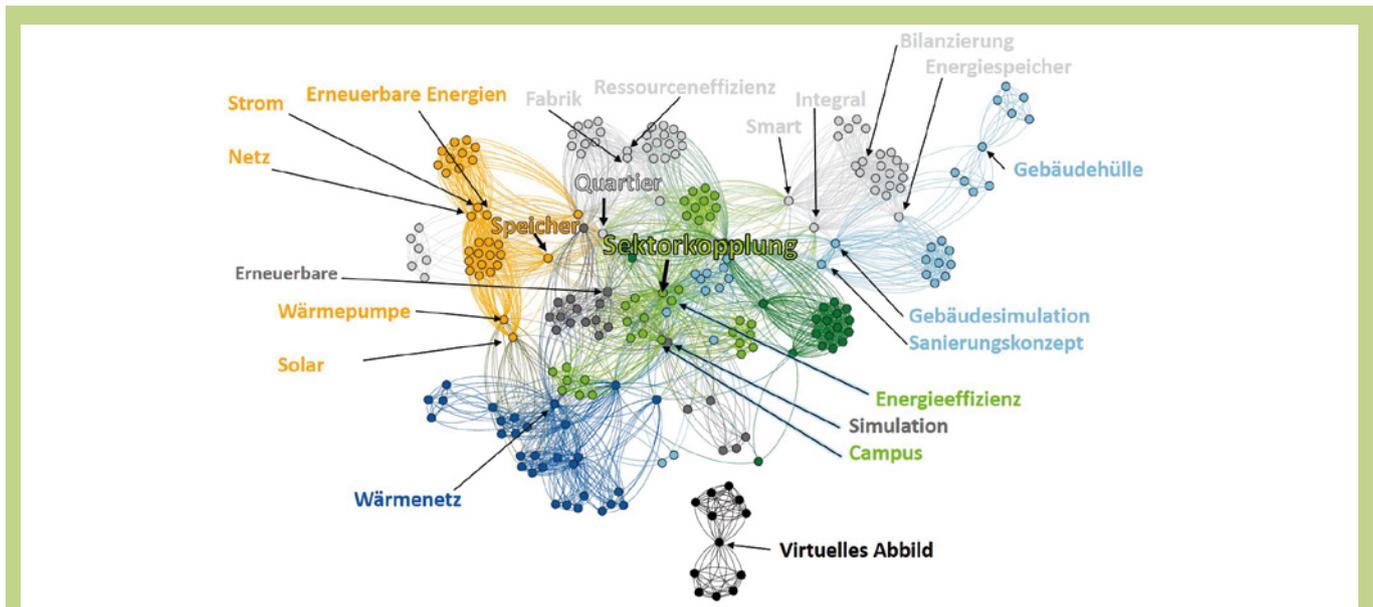


Abb. 3.5-10: Gefilterter Graph für die Kategorie Quartier

Wärme in Form von *Wärmenetzen* oder *Wärmewende*. Methodisch stehen Simulationen im Vordergrund. Abbildung 3.5-10 zeigt die visualisierte Netzdarstellung, aus der die enge Verwobenheit der Themen hervorgeht. BC als Kennwert wird hier nochmal deutlich durch die zentrale Anordnung der Schlagworte mit hohem Wert in diesem Bereich. Zwischen den beiden Befragungsphasen gibt es keine grundlegenden Änderungen bzgl. der Schlagwortanalysen. Dies zeigt Abbildung 3.5-11. Aufgetragen ist hier die Änderung des Rangs eines Schlagworts von Phase 2 in Phase 3 der Befragung über den Rang des Wortes auf Grund seines Grads. Die Worte mit hoher Relevanz weisen einen hohen Grad auf und stehen in der Rangfolge dementsprechend vorne. Diese Worte unterliegen nur sehr geringen Änderungen in ihrem Rang, welche daher

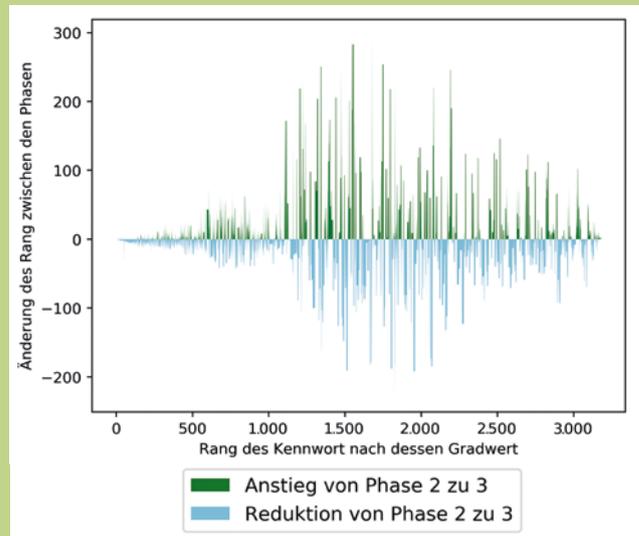


Abb. 3.5-11: Änderungen der Knotengrade zwischen den Fragebogenphase 2 und 3

nur geringfügige Änderungen für das gesamte Netz haben. Hohe Änderungen weisen nur Worte mit geringem Grad bzw. hohem Rang auf. Themen, deren Relevanz zwischen den beiden Phasen zugenommen hat, sind unter anderem: Datenmanagement, Gebäudehüllsanierung, Wasserstoff-Anwendungen oder Lastverschiebepotentiale. Unter den Themen, die an Bedeutung verloren haben, finden sich spezielle Themen wie die Abluftwärmepumpe, Dünnglas oder Niedertemperaturtechnologien.

Abschließende Schlussfolgerungen konnten durch die vorgestellte Graphen-Analyse der Schlagworte der EWB-Projekte gewonnen werden:

- Technologieschwerpunkte innerhalb der aktuellen Forschung sind beobachtbar.
- Die Identifikation von Themen, die von zentralerer Bedeutung für die Verkettung mehrere Themenbereiche sind, ist möglich.

- Thematische Veränderungen über den Zeitraum von einem Jahr liegen im Detail und sind durch eine Schlagwortanalyse nur schwer auszumachen.

3.6 Evaluation der Methode

Es folgt eine kurze Evaluation der verwendeten Methoden. Im Vordergrund steht hierbei die Reflexion der Verwendung von quantitativen Umfragen.

3.6.1 Umfragebeteiligung und Antwortqualität

Über die drei Befragungsphasen, die im Abstand von einem Jahr und einer Dauer von ca. 2 Monaten durchgeführt wurden, ist eine variierende Teilnehmeranzahl festzustellen. Tabelle 3.6-1 gibt hierzu einen Überblick. Insgesamt wurden in den Befragungsphasen 566, 919 und 833 Teilnehmer eingela-

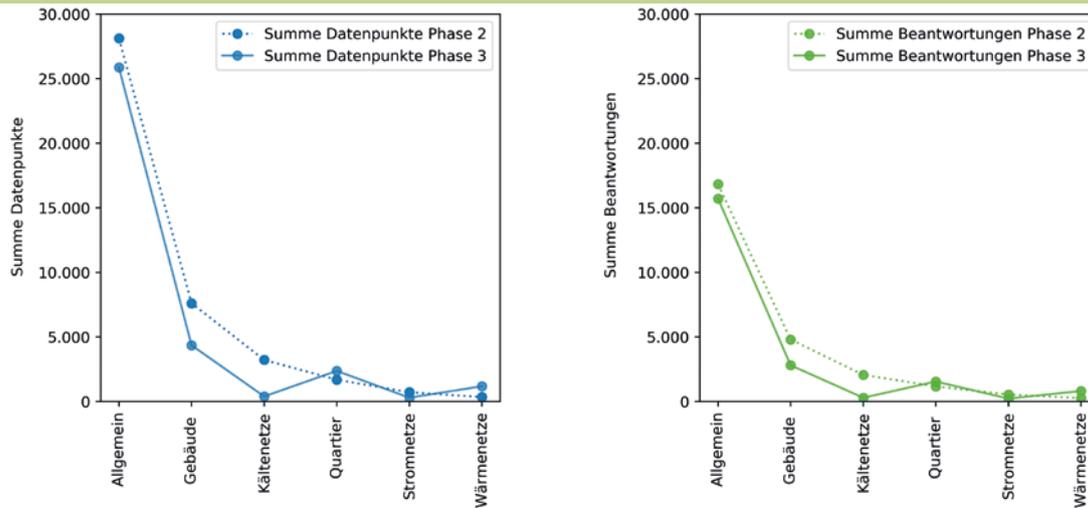


Abb. 3.6-1: Summe der beantworteten Fragen innerhalb der Kategorien

Tabelle 3.6-1: Beteiligung an den quantitativen Umfragen

Befragungsphase	Phase1	Phase2	Phase3
Versandte Einladungen	566	919	833
Fragebogen initialisiert (mit Beantwortung begonnen)	406	438	515
Initialisierungsrate	72 %	48 %	62 %
Komplett ausgefüllte Umfragen	- ¹	253	263
Gesamtrate	- ¹	28 %	32 %

den. Davon haben ca. 48 % bis 72 % der angeschriebenen Projekte den Fragebogen beantwortet. Die eingeladene Teilnehmeranzahl hat sich von Phase 1 auf Phase 2 stark verändert, ist aber von Phase 2 auf 3 relativ gleich geblieben, wobei 137 Projekte wiederholt befragt und 126 neu befragt wurden. Es wurde die Erfahrung gemacht, dass der gewählte Befragungszeitraum vorteilhaft für die Beantwortungsquote ist und der Abstand zwischen den Befragungen ausreichend groß, damit wiederholt befragte Projekte neue Erkenntnisse gewonnen haben. In Phase 2 wurden insgesamt ca. 35.000 Datenpunkte erfasst und in Phase 3 mit 41.700 ca. 20 % mehr. Abbildung 3.6-1 zeigt die Datenpunktverteilung auf die Kategorien. Aufgrund der Fragebogenstruktur sind die Kategorien Technologien, Digitale Werkzeuge, Methoden & Konzepte und Akzeptanzforschung unter Allgemein zusammengefasst. Vor allem die Ka-

¹Keine Angabe für Phase 1, da auf Grund einer anderen Struktur dieser Phase kein Vergleich der Werte mit den Phasen 2 und 3 möglich.

tegorien Technologie, Gebäude und Digitale Werkzeuge sind für einen großen Teil der Datenpunkte verantwortlich. Insgesamt haben Methoden & Konzepte, Technologien und Digitale Werkzeuge die höchste Datengewinnung pro Frage erzielt.

In den Unterkategorien (z. B. Anlagentechnik, Kennwerte) bestätigt sich der von Porst [6] eingangs beschriebene Umstand eines Abfalls von Antworten mit der Befragungslänge. Dies bedeutet, Fragen die weiter hinten im Fragebogen positioniert sind, werden weniger häufig beantwortet als zu Beginn positionierte. Dies liegt entweder an der steigenden Spezialisierung der Fragen oder der sinkenden Motivation der Teilnehmer mit steigender Länge der Befragung. Dieser Zusammenhang ist in Abbildung 3.6-2 beispielhaft für die Kategorie Gebäude dargestellt und in Abbildung 3.6-3 für alle Kategorien und Unterkategorien (vgl. Abb. 3.3-1).

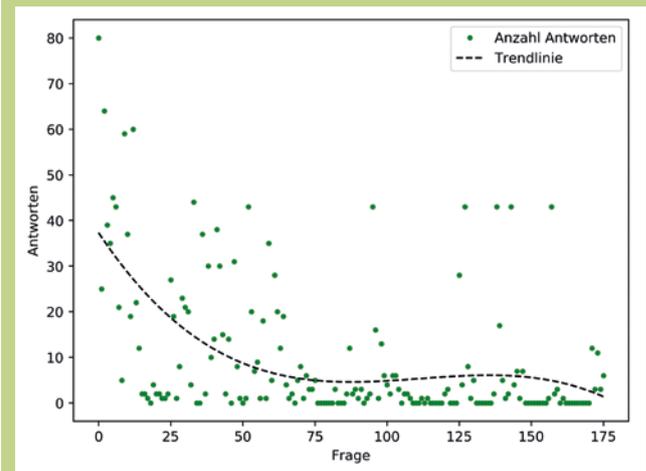


Abb. 3.6-2: Trendlinie der Antworten in der gesamten Gebäudekategorie

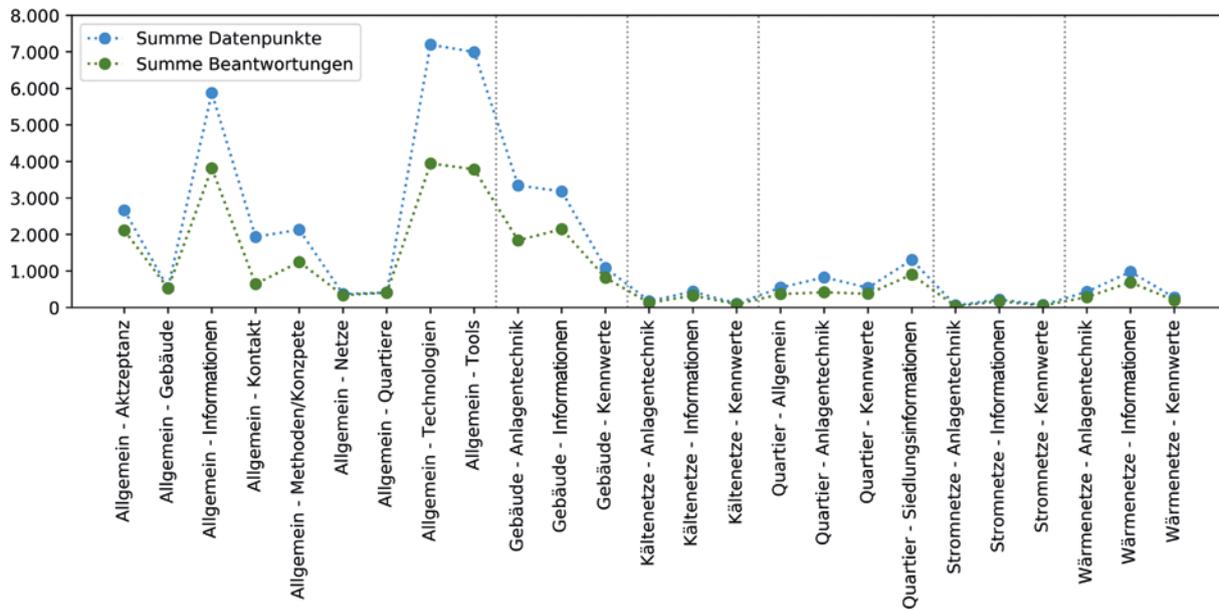


Abb. 3.6-3: Summe der Datenpunkte und Beantwortungen jeder Kategorie und Unterkategorie in Phase 3

3.6.2 Beobachtete Vor- und Nachteile der Umfragen

Zur Unterstützung zukünftiger Arbeiten werden die beobachteten zentralen Vor- und Nachteile zur Verwendung eines Fragebogens im Rahmen eines übergreifenden Forschungsprojekts diskutiert.

Die tatsächliche Beteiligungsbereitschaft konnte seitens der BF im Vorhinein nur schwer abgeschätzt werden. Vorteilhaft ist in diesem Fall die digitale Form der Umfrage zur Reduzierung von Kosten- und Zeitaufwand sowohl bei der BF als auch bei den Projekten. Für die Auswertung eignet sich die Entwicklung eines Software-Frameworks zeitgleich zur Entwicklung der Umfrage, um Umfrage und Auswertung aufeinander abstimmen zu können. Ein

Beispiel stellt hier die Kombination einer SQL-Datenbank und einer Auswertungswebsite dar.

Bei der Erhebung der Daten wird auf eine wahrheitsgetreue und vollständige Eingabe durch die Befragten vertraut. Durch eine hohe Fragenanzahl sowie Fragen mit hoher Spezifikation wird dem jedoch entgegengewirkt. Ein Abfall in der Beantwortungsquote ist beobachtbar. Je spezieller das Themenfeld wird, desto eher sollte die Umfrage daher kurzgehalten werden. Im umgekehrten Fall scheint eine Umfrage mit hoher Fragenanzahl auf grober Detailebene umsetzbar. Das Abfragen spezifischer Daten zu Anlagentechnik und Kennwerten in Gebäuden und Quartieren hat sich als nachteilig herausgestellt, da die Umfrage hierdurch sehr lang wird und durch wenige Antworten in diesen Berei-

chen kein Mehrwert für die Auswertung generiert werden konnte.

Eine quantitative Umfrage zur Lösung verschiedener Aufgaben einzusetzen stellt sich als Nachteil heraus, da die Daten in vielen Aufgabenbereichen dann nur auf einem mittleren Qualitätsniveau eingesetzt werden können. Hier scheint eine klare Unterteilung in verschiedene thematische und aufgabenspezifische Umfragen zu unterschiedlichen Zeitpunkten mit spezifizierten Teilnehmern die bessere Lösung.

Fachbegriffe, die in der Umfrage verwendet werden, sollten durch ein Glossar gut voneinander abgegrenzt werden, damit bspw. bei Zuordnung zu Typen oder Aktivitäten die Vergleichbarkeit der Antworten gewährleistet ist und eine Hilfestellung bei der Beantwortung gegeben wird.

Insgesamt kann resümiert werden, dass die Auswertungen auf einer übergreifenden Metaebene sehr gut möglich gewesen sind und ein Überblick der Forschungslandschaft EWB gegeben werden konnte. Auf Detailebene gestaltete sich dies aber schwieriger, da die Antwortanzahlen der benötigten Fragen durch ihre Spezialisierung stark sanken.

3.7 Fazit und Ausblick

Im Rahmen der quantitativen Befragungen zeigen sich auf der Metaebene dieser Auswertung nur geringfügige Unterschiede zwischen den beiden analysierten Befragungsphasen. Es zeigt sich eine weitestgehend gleichmäßige Verteilung auf die von der BF eingeführten Projektkategorien. Acht unterschiedliche Förderinitiativen sind Teil von EWB, wobei *Energieoptimiertes Bauen (EnOB)* mit etwa

40 % den größten Anteil einnimmt. Eingesetzte und erforschte Technologien der Projekte kommen hauptsächlich aus dem Wärme-, Kälte- und Stromerzeugungsbereich. Im Gebäudebereich stehen Umsetzungs- und Monitoringprojekte im Vordergrund, während im Quartiersbereich vor allem Konzept- und Simulationsstudien durchgeführt werden. Die nicht-technischen Hemmnisse für den Projekterfolg scheinen in der Forschungslandschaft EWB sehr unterschiedlich gelagert. Zukünftig könnten quantitative Umfragen im Rahmen von Begleitforschungen zur Abfrage spezieller Themen eingesetzt werden. Diese Fragebögen könnten kürzer ausfallen und die Empfängergruppe verkleinert werden. Hierzu könnte eine themenbezogene Vorauswahl der Teilnehmer aus der Gruppe aller EWB-Projekte und die Erstellung themenspezifischer Umfragen erfolgen.

Die Evaluierung der verwendeten Methode zeigt eine Beantwortungsquote zwischen 48 % bis 72 % für die quantitativen Umfragen. Des Weiteren korreliert der Befragungszeitraum selbst und der Abstand zwischen den Befragungsphasen mit der Beantwortungsquote und ein Abfall der Antwortanzahl mit steigender Befragungslänge kann festgestellt werden. Von Vorteil ist der Einsatz eines Glossars zur Standardisierung der Begriffe innerhalb der Umfrage. Als nachteilig zeigt sich die Verwendung einer Umfrage für verschiedene voneinander unabhängige Aufgaben bzw. Fragestellungen.

Ein Hauptergebnis der Textmining- und Netzwerkanalysen ist, dass diese Methode geeignet ist, um die Forschungslandschaft EWB abzubilden und zu analysieren. Des Weiteren zeigt sich, dass die The-

mengebiete in EWB stark voneinander abhängen und aufeinander aufbauen. Die Forschungsschwerpunkte entsprechen insgesamt den vorgegebenen Zielen des BMWi. Methodisch scheinen vor allem Simulations- und Optimierungsmethoden sowie das Monitoring verwendet zu werden, häufig auch in Kombination miteinander. Aus einer Analyse der Kantendichte lässt sich schließen, dass die thematische Verknüpfung zwischen Quartiers- und Netzprojekten signifikant höher ist, als die Verknüpfung zwischen Projekten der anderen Kategorien. Die Analyse der Betweenness Centrality zeigt unter anderem, dass im Quartiersbereich vernetzende Themen (z. B. Sektorkopplung, Vernetzung, Stadt) stark im Vordergrund stehen. Zukünftig könnte die thematische Entwicklung des Forschungsbereichs auf einen längeren Zeitraum ausgedehnt werden. Ansätze der Literatur zeigen, dass hierdurch die Prognose zukünftiger Entwicklungen eines Bereichs möglich wird. Auch könnten weitere Methoden des Natural Language Processing (z. B. Topic Modelling, Latent Dirichlet Analyse) auf den bestehenden Datensatz angewendet werden.

Literatur:

- [1] Forschungsinstitut Jülich GmbH, Projektträger Jülich, EnArgus. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), [Online] <https://www.enargus.de/>.
- [2] Voss K., Spars G., Wagner A., Lützkendorf T., Energieoptimiertes Bauen- Status Quo und Perspektiven eines Förderprogramms des BMWi. HLH: Heizung, Lüftung, Klima, Gebäudetechnik, Bd. 62, Nr. 10, pp. 18-25, 2011.
- [3] Wissenschaftliche Begleitforschung Energiewende-

bauen, 1. Kongress Energiewendebauen. Jülich: Forschungszentrum Jülich GmbH, Projektträger Jülich, 2017.

- [4] Luukkonen-Gronow T., Scientific research evaluation: a review of methods and various contexts of their application. R&D Management, pp. 207-221, 1987.
- [5] Möckel C., Schumacher G., Hake J.-F., Können wir zukünftige Entwicklungen vorhersagen - Methoden zur Technologie-Vorausschau. Chemie unserer Zeit, pp. 232-242, 2019.
- [6] Porst R., Fragebogen- Ein Arbeitsbuch. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften, 2008.
- [7] Jakob N., Schoen H., Zerback T., Sozialforschung im Internet. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften, 2009.
- [8] Raithel J., Quantitative Forschung- Ein Praxiskurs. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften, 2006.
- [9] Betz U. A., Betz F., Kim R., Monks B., Phillips F., Surveying the future of science, technology and business – A 35 year perspective. Technological Forecasting & Social Change, pp. 137-147, 2019.
- [10] Claveria O., Monte E., Torra S., Using survey data to forecast real activity with evolutionary algorithms. A cross-country analysis, Journal of Applied Economics, pp. 329-349, 2017.
- [11] Hearst M., What Is Text Mining?, SIMS,UC Berkeley, 17. October 2003. [Online], <http://people.ischool.berkeley.edu/~hearst/text-mining.html>. [Zugriff am 3. Januar 2020].
- [12] Kim L., Ju J., Can media forecast technological progress?: A text-mining approach to the on-line newspaper and blog's representation of prospective industrial technologies, Information Processing and Management, Nr.

- 56, pp. 1506-1525, 2019.
- [13] Li N., Wu D., Using textmining and sentiment analysis for onlineforums hotspot detection and forecast, *Decision Support Systems*, Nr. 48, pp. 354-368, 2010.
- [14] Martino J. P., A review of selected recent advances in, *Technological Forecasting & Social Change*, Nr. 70, pp. 719-733, 2003.
- [15] Krempel R., Netze, Karten, Irrgärten: Graphenbasierte explorative Ansätze zur Datenanalyse und Anwendungsentwicklung in den Geisteswissenschaften [Dissertation], Köln: Universität zu Köln, 2016.
- [16] Georghiou L., Keenan M., Miles I., Popper R., *The handbook of technology foresight: Concepts and practice*. Northampton, MA, USA: Edward Elgar Publishing, 2008.
- [17] Chanchetti L., Diaz S., Milanez D., Leiva D., de Faria L., Ishikawa T., Technological forecasting of hydrogen storage materials using patent indicators, *International Journal of Hydrogen Energy*, Nr. 41, pp. 18301-18310, 2016.
- [18] Zhang Y., Porter A. L., Hu Z., Guo Y., Newman N. C., Term clumping for technical intelligence: A case study on dye-sensitized solar cells, *Technological Forecasting & Social Change*, Nr. 85, pp. 26-39, 2014.
- [19] Yoon B., Park Y., A text-mining-based patent network: Analytical tool for high-technology trend, *Journal of High Technology Management Research*, Nr. 15, pp. 37-50, 2004.
- [20] Ma T., Zhang Y., Huang L., Shang L., Wang K., Yu H., Zhu D., Text mining to gain technical intelligence for acquired target selection: A case study for China's computer numerical control machine tools industry, *Technological Forecasting & Social Change*, Nr. 117, pp. 162-180, 2017.

- [21] Li S., Garces E., Daim T., Technology forecasting by analogy-based on social network analysis: The case of autonomous vehicles., *Technological Forecasting and Social Change*, Nr. 148, 2019.
- [22] Mihalcea R., Tarau P., TextRank: Bringing Order into Texts, *Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing*, Barcelona, Spanien, 2004.
- [23] Berry M. W., Kogan J., *Text Mining: Applications and Theory*, Chichester, UK: John Wiley & Sons, 2010.
- [24] Cunningham S., *The content evaluation of British scientific research [Dissertation]*, Falmer, UK: University of Sussex, 1996.
- [25] Bastian M., Heymann S., Jacomy M., Gephi : An Open Source Software for Exploring and Manipulating Networks, *International AAAI Conference on Weblogs and Social Media*, San Jose, CA, USA, 2009.
- [26] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), *Innovationen für die Energiewende - 7. Energieforschungsprogramm der Bundesregierung*, Berlin, 2018.

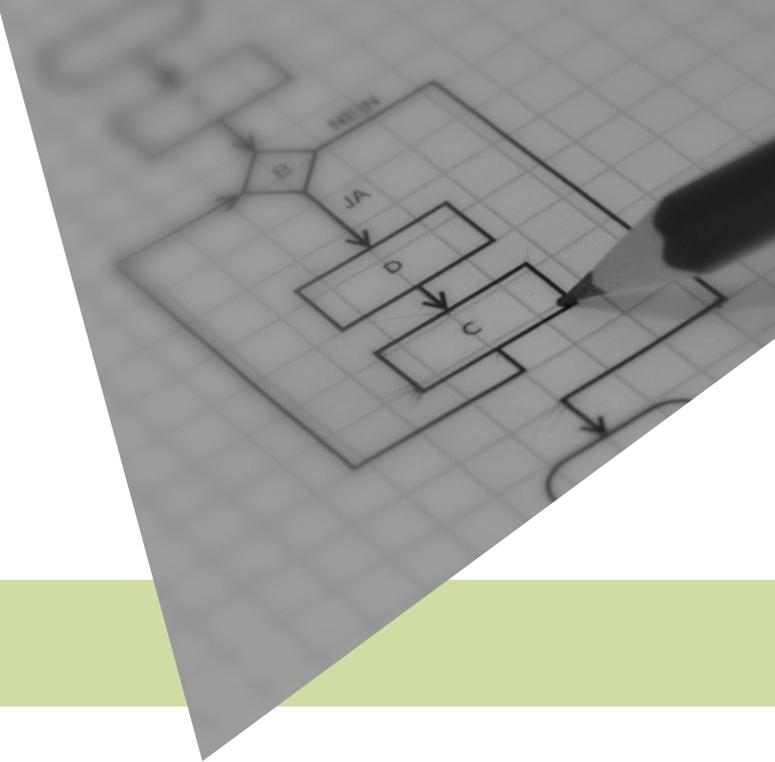
Kontakt:
RWTH Aachen
Lehrstuhl für Gebäude- und Raumklimatechnik

Jan Richarz, M.Sc.
jricharz@eonerc.rwth-aachen.de

Stephan Wegewitz, B.Sc.

Dr.-Ing. Tanja Osterhage
tosterhage@eonerc.rwth-aachen.de

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dirk Müller



04



KONZEPTE & METHODEN

KONZEPTE & METHODEN

4.1 Motivation

4.2 Gebäudebewertung über Primärenergie oder Treibhausgasemissionen?

4.3 Smart Readiness Indicator für Gebäude

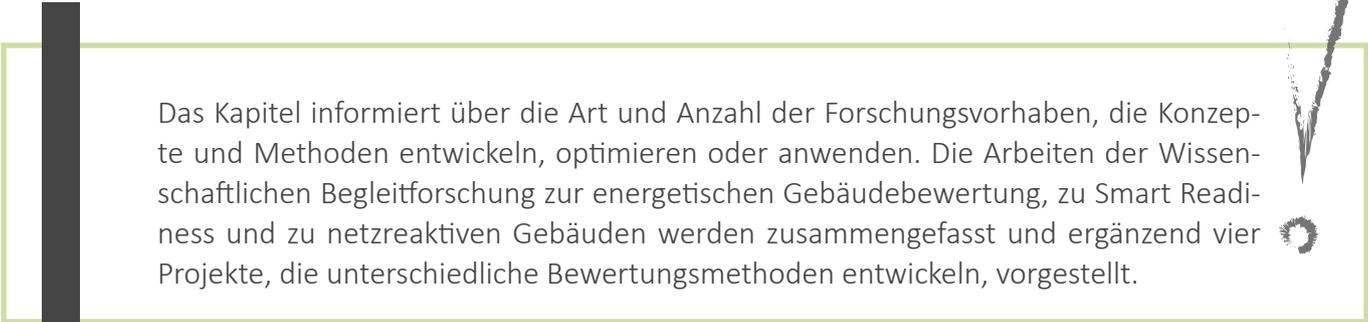
4.4 Netzreaktive Gebäude

4.5 Anlagensysteme: SolarCheck – Funktionsfähigkeit thermischer Solaranlagen

4.6 Gebäudehülle: Textil-KFFS – Bewertung textiler Sonnenschutzkomponenten

4.7 Kurzzeitmessung: Gtom – Energetische Analyse von Gebäudehüllen

4.8 Betriebsoptimierung: Nemo – Wärmenetze im energetischen Monitoring



Das Kapitel informiert über die Art und Anzahl der Forschungsvorhaben, die Konzepte und Methoden entwickeln, optimieren oder anwenden. Die Arbeiten der wissenschaftlichen Begleitforschung zur energetischen Gebäudebewertung, zu Smart Readiness und zu netzreaktiven Gebäuden werden zusammengefasst und ergänzend vier Projekte, die unterschiedliche Bewertungsmethoden entwickeln, vorgestellt.



4.1 Motivation

Insgesamt 198 Vorhaben wurden von den Projektnehmern bei der Beantwortung des Fragebogens der Begleitforschung Energiewendebauen dem Bereich „Methoden und Konzepte“ zugeordnet. Obwohl viele der Vorhaben zusätzlich andere Schwerpunkte, wie z.B. Gebäude, Quartiere und Technologien beinhalten, oder aber die Methoden am Ende in einem Tool umgesetzt werden, verdeutlicht dies die Signifikanz des Themenbereichs.

Abbildung 4.1-1 zeigt, dass die meisten dieser Vorhaben sich mit Analyse-, Bewertungs- und Planungsmethoden beschäftigen, wobei zumeist die Entwicklung der Methoden im Fokus steht. Planungsmethoden stehen oftmals in direktem Zusam-

menhang mit der Entwicklung von Planungstools, auf die genauer im Kapitel 09 eingegangen wird.

Deshalb soll in diesem Kapitel vor allem auf die Frage „Welche Bewertungs- und Analysemethoden stehen derzeit im Fokus der Gebäudeenergieforschung?“ eingegangen werden. Dabei werden zunächst Arbeiten der Begleitforschung zusammengefasst und danach vier im Bereich Energiewendebauen geförderte Beispielprojekte exemplarisch vorgestellt.

Die Wissenschaftliche Begleitforschung Energiewendebauen beschäftigte sich in den letzten vier Jahren mit folgenden Bewertungsmethoden:

- Gebäudebewertung über Primärenergie oder Treibhausgasemissionen?
- Smart Readiness Indicator für Gebäude

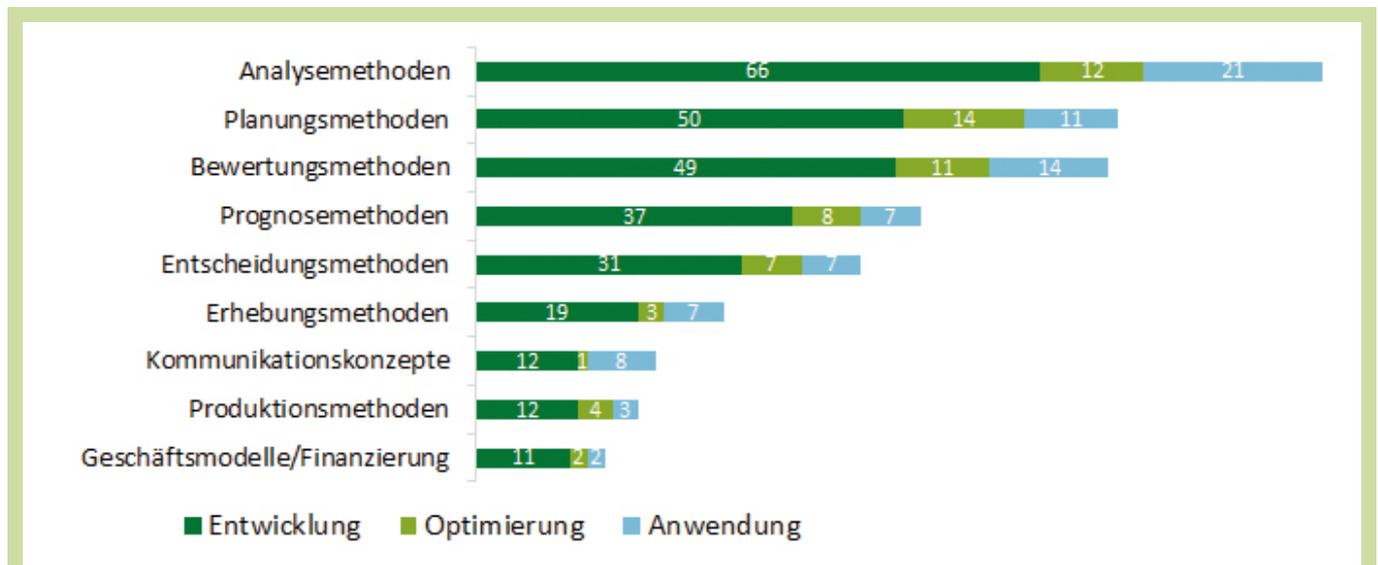


Abb. 4.1-1: Ergebnis des Fragebogens: Welche Art von Methode oder Konzept entwickeln Sie bzw. optimieren Sie bzw. wenden Sie an? Mehrfachantworten waren möglich

- Netzreaktive Gebäude
- Sektorenkopplung

Die analysierten Ergebnisse der ersten drei Bewertungsmethoden werden nachfolgend zusammengefasst. Die Arbeiten zur Sektorenkopplung werden im Kapitel 7.2 dargestellt.

4.2 Gebäudebewertung über Primärenergie oder Treibhausgasemissionen?

Laut Umweltbundesamt wird rund ein Drittel der Treibhausgasemissionen vom Gebäudebereich verursacht [1]. Der Klimaschutzplan 2050 der Bundesregierung sieht vor, bis 2050 einen nahezu klimaneutralen Gebäudebestand zu erreichen. Um die Sensitivität bezüglich der Treibhausgasemissionen zu steigern und die klimapolitischen Ziele der Bundesregierung zu erfüllen, fordern einige Stakeholder, an Stelle von oder zusätzlich zu primärenergetischen Anforderungen im Gebäudebereich die Anforderungsgröße Treibhausgasemissionen in Form von CO₂-äquivalenten Emissionen aufzunehmen. Der zum Zeitpunkt der Publikationserstellung im Bundeskabinet beschlossene Gesetzentwurf zur Novellierung des Energiesparrechts für Gebäude (Gebäudeenergiegesetz – GEG) [2] weist als Bemessungsgröße die nicht erneuerbare Primärenergie aus. Zusätzlich wird die Angabe der CO₂-äquivalenten Emissionen im Gebäudeenergieausweis gefordert. Eine Innovationsklausel lässt zeitlich begrenzt allerdings alternativ die alleinige Bewertung über die Treibhausgasemissionen zu. Derzeit gilt noch die Energieeinsparverordnung von 2014 (Verschärfung von 2016) [3].

Die Wissenschaftliche Begleitforschung Energiewendebauen führte eine Studie zu den zwei Bewertungskenngrößen durch [4]. Dabei wurde einmal anhand eines Einfamilienhaus-Modellgebäudes mit 33 unterschiedlichen Anlagenkonfigurationen und zusätzlich anhand elf realer Quartiere aus dem BMWi-Forschungsbereich EnEff:Stadt [5] untersucht, wie sich der Stellenwert von unterschiedlichen Versorgungskonzepten verändert, wenn anstatt des nicht erneuerbaren Primärenergieanteils die durch die Gebäude emittierten Treibhausgasemissionen betrachtet werden. Es sollte aufgezeigt werden, welche der untersuchten Anlagentechniken und Konfigurationen durch die Anforderung an CO₂-äquivalente Emissionen im Vergleich zur primärenergetischen Bewertung begünstigt und welche durch diese Betrachtung eher benachteiligt werden.

Die Zusammenstellung der verfügbaren Informationsquellen zu CO₂-Äquivalenten ergab kleinere Differenzen bei den Kennwerten von fast allen Energieträgern. Für die durchgeführten Analysen wurden die Primärenergiefaktoren und die CO₂-Äquivalente aus der DIN V 18599:2018 [6] gewählt. Eine besondere Herausforderung ist hierbei die Ermittlung der CO₂-Äquivalenten von Fernwärmeversorgungen. In der DIN V 18599 gibt es hierfür, anders als für die Primärenergiefaktoren, keine Vorgaben für die vier Varianten Heizwerk und Heizkraftwerk jeweils mit fossilen oder erneuerbaren Energieträgern. Deshalb musste bei der Einfamilienhausstudie mit möglichen Spannen bei der fossilerzeugten Fernwärme gerechnet werden. Im Gebäudeenergiegesetz [2], das nach der Studie veröffentlicht wurde, werden

für Fern- und Nahwärme erstmals Defaultwerte für die CO₂-Äquivalente angegeben.

Verschiebungen in der nach der Höhe des Ergebnisses geordneten Reihenfolge ergaben sich bei der Einfamilienhausstudie im Bereich der erdgasbetriebenen Heizungssysteme, die bei der CO₂-Äquivalenz-Bewertung besser als die primärenergetisch (nahezu) gleich bewerteten heizölbetriebenen Heizungssysteme abschneiden. Aufgrund der Spanne der CO₂-Äquivalente für fossile Fernwärme (von Erdgas bis hin zu Kohlebetrieb) würden manche Fernwärmeversorgungsarten im Vergleich mit der Referenztechnologie aus der EnEV nicht mehr die direkt auf CO₂-äquivalente Emissionen übertragenen energetischen Anforderungen an Gebäude einhalten.

Der direkte Vergleich der Bewertungsergebnisse bezüglich Primärenergie und CO₂-äquivalenten Emissionen bei den Quartieren zeigt nur geringe Unterschiede (wenn man Kennwerte vergleichbar skaliert werden, d. h. über die Skala der Y-Achse anpasst, siehe Abb. 4.2-1a und b). Durch die Komplexität der Quartiere mit teilweise unterschiedlichen Versorgungsarten, unterschiedlichen Gebäudetypen und energetischen Gebäudeniveaus und die Bewertung des gesamten Stromverbrauchs inkl. Nutzerstrom wird eine Interpretation der Ergebnisse erschwert. Allerdings lässt sich ebenfalls erkennen, dass ölbeheizte Heizsysteme gegenüber erdgasbetriebenen Heizsystemen leicht schlechter bewertet werden. Anders als bei der Einfamilienhausstudie wurden bei der Quartiersbewertung Primärenergiefaktoren und CO₂-Äquivalente bei Fernwärmenutzung direkt bei den betreffenden Energieversorgern ab-

gefragt. Hier ergab sich die Schwierigkeit, dass die zertifizierten Kenngrößen mit unterschiedlichen Allokationsmethoden ermittelt wurden und die Vorkettenemissionen der einzelnen Energieträger sowie die Netzverluste noch nicht enthalten sind. Im Gesetzentwurf des Gebäudeenergiegesetzes [2] ist ein Rechenansatz enthalten, um diese Anteile hinzu zu addieren, der auch bei der Quartiersbewertung der Studie verwendet wurde. Die Studie machte deutlich: bevor eine Umstellung der Bewertung von Primärenergie auf CO₂-äquivalente Emissionen durchgeführt wird, bedarf es hier noch weiterer Vereinheitlichungen in der Zertifizierungsmethode und bzgl. der beinhalteten Vorkettenemissionen.

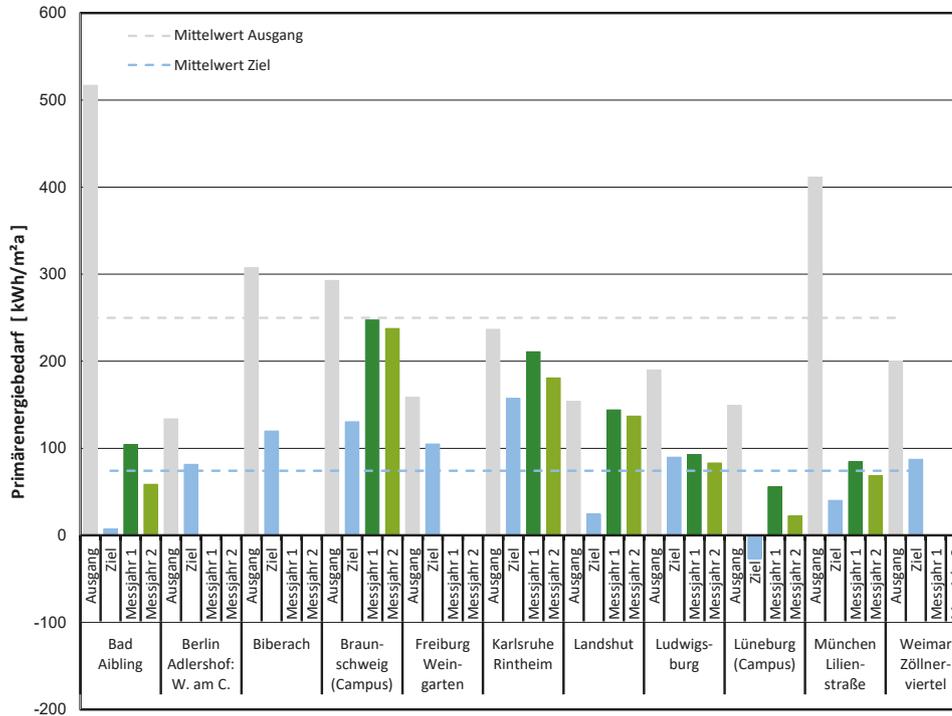


Abb. 4.2-1a: Primärenergetische Bewertung der 11 Quartiere [4]

- Eine Umstellung der Bewertungsgröße von Primärenergie auf CO₂-Äquivalenz zeigt bei den meisten Anlagenkonfigurationen nur geringe Unterschiede.
- Eine Auswirkung auf Fördermaßnahmen oder die Klimaschutzziele ist dadurch nur sehr bedingt zu erwarten.
- Im Bereich der Fernwärmeversorgung sollten einheitliche Vorgaben zur Bestimmung der CO₂-Äquivalente inklusive der dafür angewendeten Allokationsmethode festgelegt werden, bevor die Bewertungsgröße geändert werden kann.

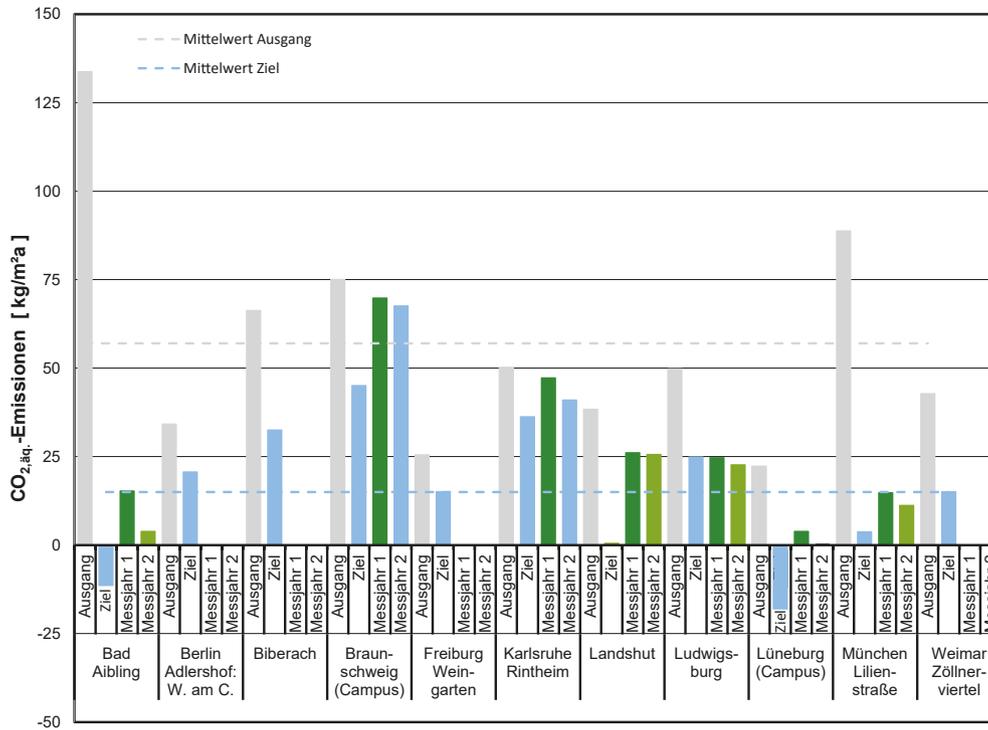


Abb. 4.2-1b: CO₂-Äquivalenz-Bewertung der 11 Quartiere [4]

4.3 Smart Readiness Indicator für Gebäude

Mit der Änderung der europäischen Gebäudeenergieeffizienzrichtlinie (EPBD) vom 30. Mai 2018 [7] hat die EU die Einführung eines Intelligenzfähigkeitsindikators für Gebäude (Smart Readiness Indicator) angekündigt. Es handelt sich um ein optionales länderübergreifendes Bewertungsschema, das in Artikel 8, Absatz 10 der Richtlinie definiert ist. Der Smart Readiness Indicator (SRI) bewertet ein Gebäude auf Nutzungsmöglichkeiten von Informations- und Kommunikationstechnik (IKT) und elektro-

nischen Systemen zur Anpassung des Gebäudes auf Nutzeranforderungen sowie Netze und zur Verbesserung der Energieeffizienz. Die EU wird die genaue Definition des SRI und die entsprechende Berechnungsmethode erarbeiten und sollte das Bewertungsschema bis zum 31. Dezember 2019 einführen. Dazu hat sie zwei technische Studien vergeben, deren Ergebnisse mit internationalen Stakeholdern gespiegelt wurden und werden. Die Endergebnisse der ersten Studie und die bereits verfügbaren Ergebnisse der zweiten Studie sind unter <https://smartreadinessindicator.eu> [8] erhältlich.

Mit dem Einsatz von intelligenten Technologien werden u. a. folgende Vorteile erhofft: optimierter Energieverbrauch basierend auf lokaler Energieerzeugung, optimierte lokale (erneuerbare) Energiespeicherung, automatische Betriebsüberwachung inklusive Instandhaltungsarbeiten und erhöhter Nutzerkomfort. Der Intelligenzfähigkeitsindikator soll die Vorteile von smarten Technologien und IKT bekannter machen und Konsumer davon überzeugen, in diese Technologien zu investieren.

Die erste EU-Studie entwickelte eine SRI-Bewertungsmethode, die auf einer Bestandsaufnahme von intelligenten Funktionen eines Gebäudes in zehn Anwendungsbereichen (Heizung, Trinkwarmwasser, Kühlung, Lüftung, Beleuchtung, Gebäudehülle, Stromerzeugung, Monitoring/Control, Elektroabeladung und Demand-Side-Management) und dem Ausmaß der eingesetzten „Intelligenz“ beruht. Das kann z. B. bei der Beleuchtungssteuerung vom einfachen Ein- und Ausschalten bis hin zum

automatischen Dimmen in Abhängigkeit der Tageslichtverfügbarkeit reichen. Die Bewertung kann mittels einer Checkliste durchgeführt werden. Die in der Studie erarbeiteten Komponenten der Bewertungsmethode sind:

- Katalog mit 112 möglichen intelligenten Funktionen in einem Gebäude,
- Bewertungskriterien (Funktionalitätslevel) und Punktzahlen (0 bis maximal 4),
- Reduzierung auf die 52 wichtigsten intelligenten Funktionen zur einfacheren Anwendung,
- Multikriterielle Bewertungsmethode mit Wichtigkeitsfaktoren für die ermittelten Punktzahlen,
- Normalisierung der SRI-Punktzahl durch den Vergleich mit dem Maximalwert, der für das entsprechende Gebäude sinnvollerweise erreichbar ist.

Im einem Workshop der Wissenschaftlichen Begleitforschung Energiewendebauen [9] wurde der Katalog als Ausgangspunkt für eine Sammlung und



Abb. 4.3-1: Einflüsse, die mit dem Smart Readiness Indicator bewertet werden [Fraunhofer IBP basierend auf [2]]

Einordnung von „smarten Technologien“ genutzt, welche in den Demonstrationsgebäuden oder -quartieren der Forschungsinitiative zum Einsatz kommen. Dabei konnten die smarten Technologien vor allem den Bereichen Heizung, Lüftung und Monitoring/Control zugeordnet werden. Smarte Technologien im Bereich von Quartieren und Nahwärme sind nicht zuordenbar, die EU-Studie fokussiert sich auf Einzelgebäude. Einzelne in den Energiewendebauen-Projekten angewendete smarte Technologien konnten dem Katalog nicht zugeordnet werden, wie z. B. eine Wärmepumpensteuerung, die die Heizungsvorlauf-temperatur in Abhängigkeit des 3-Tages-Mittels der Außenlufttemperatur regelt, eine Beleuchtungssteuerung, die den Raum in neun individuelle Felder aufteilt und diese je nach Anwesenheit beleuchtet, eine Schnittstelle, die die Wärmepumpe nach den Netzvorgaben steuert (Smart Grid-ready) und Regelungen, die über die Cloud verwaltet werden. Entsprechend dem Fokus der Forschungsinitiative sind die eingesetzten smarten Technologien meist dem Einflussbereich Energieeinsparung und erst in zweiter Linie dem Nutzerkomfort oder der Netzkompatibilität zuzuordnen. Allerdings gab es viele smarte Technologien, die zwei oder gar alle drei Bereiche abdecken. Die Einordnung in die bis zu fünf Funktionalitätslevel war für spezifische Technologien nicht immer einfach.

Unabhängig von der Definition des Smart Readiness Indicators in der EU Gebäudeeffizienzrichtlinie wurde im Workshop versucht, ein gemeinsames Verständnis von smarten Gebäuden und smarten Quartieren zu entwickeln. Dabei wurden jeweils folgende beschreibende Aussagen als am wichtigsten erachtet:

Ein smartes Gebäude...

... hat einen hohen Nutzerkomfort,
... ist einfach bedienbar,
... ist lernfähig,
... beinhaltet Sektorkopplung (Wärme/Strom/Kälte/Verkehr),

... passt sich an variable Anforderungen an.

Ein smartes Quartier...

... besteht aus einer Ansammlung von smarten Gebäuden, die u. a. Überschussenergie austauschen
... beinhaltet Speichertechnologien
... berücksichtigt auch den Verkehr
... braucht einen genossenschaftlichen Charakter oder einen risikobereiten Investor.

- 
- Die EU entwickelt derzeit ein optionales länderübergreifendes Bewertungsschema zur Intelligenzfähigkeit (Smart Readiness) von Gebäuden.
 - In einem Workshop mit Projektleitern aus der Forschungsinitiative Energiewendebauen wurde die Methode anhand von eingesetzten smarten Technologien gespiegelt und einzelne Anwendungsprobleme aufgezeigt.
 - Die Projektleiter erarbeiteten Definitionen für ein smartes Gebäude und ein smartes Quartier.

4.4 Netzreaktive Gebäude

Auf Grund der fluktuierenden Energiebereitstellungscharakteristik von erneuerbaren Energie-Anlagen (insbesondere Wind- und PV-Anlagen) und des für die Zukunft angestrebten erhöhten Anteils von erneuerbaren Energien am deutschen Strom-Mix wird die Verfügbarkeit elektrischer Energien aus den genannten Anlagen großen zeitlichen Schwankungen unterliegen. Weil elektrische Energie nur begrenzt und zu vergleichsweise hohen Kosten gespeichert werden kann, liegt ein weiterer Ansatz zur Nutzung und Glättung von Verfügbarkeitsschwankungen in dem netzreaktiven Betrieb elektrischer Verbraucher bzw. Erzeuger. Ziel ist es, den elektrischen Bezug aus dem Versorgungsnetz bzw. die Einspeisung an die zu einem Zeitpunkt verfügbare Elektrizität im Energiesystem anzupassen. Netzreaktivität bezeichnet den Ansatz, ein strombasiertes Signal in die Regelungen der Anlagen zur Wärme- und Kälteerzeugung einzubeziehen [10]. Ein netzdienliches Gebäude verhält sich konform zu den Zielen des Lastmanagements [11]. Entsprechend besitzt ein solches Gebäude die technologischen Voraussetzungen zur Verschiebung elektrischer Lasten. Hierbei werden zur Erreichung bzw. zur Steigerung der Netzdienlichkeit von Gebäuden drei Ansätze verfolgt:

- Umschalten zwischen unterschiedlich angetriebenen Wärme- und Kälteerzeugern (z. B. elektrische Wärmepumpe und Erdgasbrennwertgerät, Kompressionskälteanlage und Absorptionskälteanlage),

- Nutzung von technischen Speichern (z. B. elektrische Batterie oder thermischer Speicher),
- Nutzung der thermischen Masse des Gebäudes als Wärme- oder Kältespeicher (thermische Aktivierung massiver Bauteile).

Gemäß einer Auswertung der Wissenschaftlichen Begleitforschung zur BMWi-Forschungsinitiative Energiewendebauen [12] wurden und werden in insgesamt 16 Projekten Forschungen mit einem „netzreaktiven Forschungsfokus“ durchgeführt. In den Vorhaben werden sowohl netzreaktive Einzelgebäude (8 Projekte), netzreaktive Quartiere (6 Projekte) als auch netzreaktiv betriebene Einzelkomponenten (2 Projekte) analysiert. Eine Analyse der Projektziele zeigt, dass im Großteil aller Projekte die Entwicklung von netzdienlichen Betriebsstrategien und -modi bzw. eine netzdienliche Betriebsoptimierung im Vordergrund steht.

Gegenstand des Projekts „LowEx – Netzreaktive Gebäude – Ganzheitliche Bewertung von Bauphysik und Gebäudeenergiesystemen einschließlich ihrer Rolle in der Energiewirtschaft“ [13], [14] ist es, Kenngrößen und Methoden zur Charakterisierung, Beschreibung und Bewertung der Netzreaktivität zu entwickeln. Dabei kann die Bewertung innerhalb fünf verschiedener Bilanzgrenzen durchgeführt werden:

1. Flexible Lasten: Wärmepumpe, Kältemaschine, Blockheizkraftwerk, Speicher, Batterie
2. Gebäude: Gebäude und thermische Last, fixe Lasten/Erzeuger und flexible Lasten
3. Quartier/Teilnetz: Netz- oder regelungstechnischer Gebäudeverbund

4. Region: Gebiet eines regionalen Energieversorgers oder Netzbetreibers, politische Einheit
5. Land: Nationaler Energiemarkt/Strommix, „vorgelagertes Energiesystem“

Die im Projekt entwickelten Bewertungsgrößen waren die Grid Support Coefficients, die Primärenergie-Nutzungszahl und der netzbezogene Primärenergiebedarf.

Die Grid Support Coefficients quantifizieren die Übereinstimmung der elektrischen Last mit der relativen Verfügbarkeit von Strom im nationalen Energiesystem. Die Verfügbarkeit kann dabei eine marktwirtschaftliche Verfügbarkeit oder aber eine technische Verfügbarkeit darstellen und wird durch ein Netzsignal widergespiegelt. Vier im Forschungsprojekt verwendete Netzsignale sind der EEX-Day-Ahead-Preis (EEX), die Residuallast (RES), der (nicht-erneuerbare) kumulierte Energieverbrauch (KEV) und der Anteil von Wind und PV im nationalen Strommix (WPV). Der absolute Grid Support (GSC_{abs}) gibt an, ob Strom –im gewichteten Mittel– bei einer über- oder unterdurchschnittlich hohen Stromnachfrage bezogen wird. Der relative Grid Support Coefficient (GSC_{rel}) stellt den GSC_{abs} in Bezug zu seinen potentiellen Extremwerten und ist deshalb unabhängig von Betriebskennwerten und der Varianz des Netzsignals.

Die dimensionslose Primärenergie-Nutzungszahl (PNZ) gibt Aufschluss über die primärenergetische Effizienz der betrachteten Anlage. Sie wird als Quotient aus der in einem Betrachtungszeitraum erzeugten Wärmemenge und der Summe des Produkts aus zeitvariantem Strombezug und zeitvariantem Primärenergiefaktor bestimmt. Zu Zeiten lokaler

Stromüberschüsse (negative Residuallast) wird der Primärenergiefaktor zu Null gesetzt, zu Zeiten positiver Residuallast auf den konstanten Wert des Primärenergiefaktors für Graustrom.

Eine weitere Methodik zur Bewertung der Netzreaktivität eines Gebäudeenergiesystems ist die aufgewendete Primärenergie inklusive einer direkten Abbildung der netzdienlichen Einflüsse auf diese Kenngröße. Dabei bestehen drei Möglichkeiten zur Berechnung des Primärenergiefaktors in Abhängigkeit der Bilanzgrenze und der gewünschten Aussage des Ergebnisses:

- Zeitvarianter Primärenergiefaktor des gesamten nationalen Strommixes: Bestimmende Faktoren sind die primärenergetisch gewichteten Leistungen der Kraftwerke und der Wirkungsgrad des elektrischen Netzes.
- Primärenergiefaktor des Ergänzungsstrommix zur Bewertung eines zusätzlichen Verbrauchers im Energiesystem.
- Netzbezogener Primärenergiefaktor zur Abbildung der Einflüsse des lokalen Verteilnetzes.

Mittels einer Bewertung durch Grid Support Coefficients wird das Ziel der Maximierung der (Markt-) Effizienz der Stromversorgung auf nationaler Ebene verfolgt. Durch eine Optimierung der Primärenergie-Nutzungszahl wird hingegen eine maximale Deckung zwischen lokaler Last und lokaler Erzeugung innerhalb des betrachteten Quartiers oder Gebietes erzielt. Durch eine Kalkulation mit dem PEF des nationalen Strommixes wird die eingesetzte Primärenergie der Stromversorgung minimiert. Durch Verwendung des netzbezogenen Primärenergiefaktors werden darüber hinaus Netzengpässe minimiert.

Die Wissenschaftliche Begleitforschung Energie-wendebauen hat einen Ansatz zur systemischen Bewertung von Gebäuden und Quartieren entwickelt, der auch auf netzreaktive Gebäude anwendbar ist. Die Arbeiten sind im Kapitel 7.2 zusammengefasst. Derzeit wird darüber hinaus von interessierten Kreisen im Rahmen des DIN SPEC Projektes 91410-2 „Energieflexibilität–Identifizierung und Bewertung von Flexibilität in Stadtquartieren“ normativ versucht, eine Methodik der Flexibilisierungsbewertung von Quartieren festzulegen [15].

- 
- Es existiert derzeit keine einheitliche Bewertungsmethode für die Netzdienlichkeit von (Gebäude-)Energiesystemen.
 - Aktuelle Forschungsvorhaben zur Verbesserung der Netzdienlichkeit beinhalten unterschiedliche Ziele, z. B.:
 - Maximierung des Eigenverbrauchs von erneuerbaren Energien,
 - Entlastung des Stromnetzes zur Vermeidung von Engpässen,
 - Optimierung hinsichtlich marktwirtschaftlicher Zielfunktionen.
 - Im Rahmen einer DIN SPEC Initiative wird derzeit versucht, eine Methodik der Flexibilisierungsbewertung von Stadtquartieren normativ festzulegen.

Literatur:

- [1] Umweltbundesamt, Energiesparende Gebäude, 22.02.2016, [Online].
- [2] Bundesregierung, Entwurf eines Gesetzes zur Vereinheitlichung des Energieeinsparrechts für Gebäude, 22.01.2020.
- [3] Bundesregierung, Zweite Verordnung zur Änderung der Energieeinsparverordnung vom 18. November 2013.
- [4] Lyslow, L., Erhorn-Kluttig, H., Energetische Gebäude- und Quartiersbilanzierung bei Anwendung von Primärenergiefaktoren und CO₂-Äquivalenten, Begleitforschung Energiewendebauen, ISBN 978-3-942789-98-1, 2018.
- [5] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, Forschung für energieoptimierte Gebäude und Quartiere, Energieeffiziente Stadt (EnEff:Stadt). [Online]
- [6] Beuth Verlag (Hrsg.), DIN V 18599-1:2018-09: Energetische Bewertung von Gebäuden – Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung – Teil 1: Allgemeine Bilanzierungsverfahren, Begriffe, Zonierung und Bewertung der Energieträger.
- [7] Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union, Richtlinie (EU) 2018/844 vom 30. Mai 2018 zur Änderung der Richtlinie 2010/31/EZ über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden und der Richtlinie 2012/27/EU über Energieeffizienz, Amtsblatt der Europäischen Union, L 156/75.
- [8] VITO NV, Smart Readiness Indicator for Buildings. Webseite der zwei von der EU beauftragten Studien zum Intelligenzfähigkeitsindikator von Gebäuden, <https://smartreadinessindicator.eu>.
- [9] Wissenschaftliche Begleitforschung Energiewendebauen, Projektleitertreffen „Zukunftsweisende Versorgungsstrategien für Quartiere“, Schriftenreihe der Wissenschaftliche Begleitforschung Energiewendebauen, ISBN 978-3-942789-90-5.
- [10] Elsässer, P., Vom +energiegebäude zum netzreaktiven Quartier, Drees & Sommer, 2017, [Online].
- [11] Kalz, D., Netzdienliche Gebäude unterstützen die Integration erneuerbarer Energien, Fraunhofer ISE, 2016, [Online].
- [12] Henn, S., Osterhage, T., Müller, D., Kharboutli, S., Flemming, S., Querauswertung – Konzept zur netzreaktiven Gestaltung von Einzelgebäuden, Schriftenreihe Wissenschaftliche Begleitforschung Energiewendebauen, ISBN 978-3-942789-91-2, 2018.
- [13] Fraunhofer ISE, Fraunhofer IWES, LowEx – Netzreaktive Gebäude – Ganzheitliche Bewertung von Bauphysik und Gebäudeenergiesystemen einschließlich ihrer Rolle in der Energiewirtschaft: Energie, Exergie, Leistungsbezug und -abgabe, Abschlussbericht, Freiburg/Kassel, 2017.
- [14] Müller, D., Monti, A., Stinner, S., Schlösser, T., Verbundvorhaben „Netzreaktive Gebäude – Ganzheitliche Bewertung von Bauphysik und Gebäudeenergiesystemen einschließlich ihrer Rolle in der Energiewirtschaft: Energie, Exergie, Leistungsbezug und -abgabe, Abschlussbericht, Aachen, 2017.
- [15] DIN, DIN SPEC 91410-2, Energieflexibilität- Teil 2: Identifizierung und Bewertung von Flexibilität in Stadtquartieren, Businessplan 2020-01, Berlin, 2020, [Online].

Beispiele für entwickelte Bewertungsmethoden innerhalb Energiewendebauen

Aus der Vielzahl der Bewertungs- und Analysemethoden wurden beispielhafte Projekte ausgewählt, die die Breite der Entwicklungsthemen verdeutlichen und im Folgenden präsentiert werden. Dabei sind enthalten: eine Testmethode für Anlagensysteme, eine Bewertung von baulichen Komponenten, eine Kurzzeitmessung und eine Methode zur Betriebsoptimierung.

Kontakt:

Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP

Dipl.-Ing. Heike Erhorn-Kluttig
heike.erhorn-kluttig@ibp.fraunhofer.de

Dipl.-Ing. Hans Erhorn
hans.erhorn@ibp-extern.fraunhofer.de

Dipl.-Ing. (FH) Linda Lyslow
linda.lyslow@ibp.fraunhofer.de

4.5 Anlagensysteme: SolarCheck–Funktionsfähigkeit thermischer Solaranlagen

Die Beurteilung, ob eine solarthermische Anlage zur Unterstützung der Trinkwarmwasserbereitung (TWW) oder der Raumheizung in Ein- und Mehrfamilienhäusern gut oder schlecht funktioniert, ist mitunter sehr komplex. Neben den örtlichen Rahmenbedingungen, wie der derzeitigen Einstrahlung und der Außentemperatur, müssen Anlagenparameter wie die Kollektorfläche bekannt sein. Zusätzlich beeinflusst der Energieverbrauch, also der Baustandard oder Heizwärmebedarf des Gebäudes und der Bedarf an TWW, entscheidend die Effizienz einer Anlage. Aufgrund dieser Einflüsse ist eine Einschätzung der Funktionsfähigkeit auf Grundlage einfacher Messgrößen, wie der kWh-Zähler bei der PV bzw. die eingespeiste solare Energie allgemein, nicht möglich.

Andere in der Solarthermie zur Bewertung eingesetzte Kennzahlen wie die eingesparte konventionelle Energie (als relative Größe durch f_{sav} angegeben) oder der solare Nutzungsgrad berücksichtigen bereits einige Abhängigkeiten, sind allerdings system- sowie standortabhängig und lassen sich aus diesem Grund für verschiedene Anlagen nicht direkt miteinander vergleichen. Zur Bewertung dieser Kennzahlen werden daher Vergleichssimulationen benötigt, welche aufgrund des verbundenen Aufwands meist nicht durchgeführt werden.

Um diese Problemstellungen zu adressieren, wurde im Projekt SolarCheck ein Leistungsindikator auf Basis der Fractional Solar Consumption (FSC) aus dem IEA SHC Task 26 entwickelt und getestet [1]. Dieser

Indikator berücksichtigt den Wärmebedarf des Gebäudes, die solare Einstrahlung und die Anlagengröße. Es wird somit ermöglicht, die Systemleistung anhand einer einzelnen anschaulichen Kennzahl zu bewerten und auch verschiedene Anlagen standort- sowie größenunabhängig miteinander zu vergleichen. Darüber hinaus werden in SolarCheck Algorithmen zur automatisierten Funktionskontrolle solarthermischer Anlagen entwickelt, um Fehlfunktionen im Betrieb schnell zu detektieren und so die Systemeffizienz zu erhöhen.

4.5.1 Merkmale der Testmethode

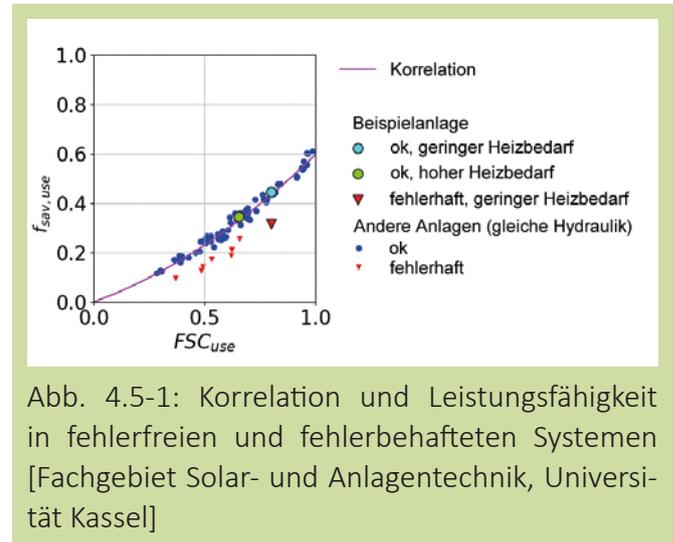
Um die Ertragsbewertung mit FSC-Methodik nach [1] durchführen zu können, müssen einige Messgrößen vorhanden sein. Neben der Messung des aktuellen Verbrauchs (Trinkwarmwasser Q_{dhw} und Raumheizung Q_{sh} , zzgl. Zirkulation) sind die erzeugte Nutzenergie des Kessels Q_{aux} und die Einstrahlung in Kollektorebene zu erfassen. FSC berechnet dann den theoretisch möglichen Anteil am Wärmebedarf, welcher über Solarenergie ohne Berücksichtigung eines Kollektorkreisnutzungsgrades gedeckt werden kann. Hierzu werden Monatssummen der Einstrahlung auf die Kollektorfläche und des Wärmeverbrauchs verglichen. Der jeweils kleinere Wert wird aufsummiert und durch den Referenzbedarf desselben Gebäudes geteilt:

$$FSC_{use} = \frac{E_{sol,usable}}{E_{ref}} = \frac{\sum_{m=1}^{12} \min[(A_{col} \cdot H_{t,m}), E_{ref,m}]}{Q_{dhw} + Q_{sh} + Q_{loss,ref}}$$

Der Referenzbedarf berechnet sich hierbei aus dem gemessenen Verbrauch und abgeschätzten Speicherverlusten eines konventionellen Systems. Im Gegensatz zu der FSC-Originalmethodik werden nicht die Endenergien, sondern die gemessenen Nutzenergien verwendet, um Unsicherheiten durch unbekannte Nutzungsgrade der Nachheizung zu vermeiden.

Zwischen den Kennzahlen FSC (theoretischer solarer Deckungsgrad) und f_{sav} (zu erwartender solarer Anteil aus Simulationen) besteht ein quadratischer Zusammenhang (Korrelation), siehe Abb. 4.5-1. Mit dieser Korrelation ist es dann möglich, aus der gemessenen Einstrahlung und dem Wärmeverbrauch den zu erwartenden solarer Deckungsgrad zu berechnen. Durch den Vergleich des zu erwartenden und des tatsächlich erzielten f_{sav} kann somit die Systemeffizienz bewertet werden. Um die Funktionsweise zu veranschaulichen, zeigt Abb. 4.5-1 die Korrelation für ein Kombisystem mit internem TWW-Wärmeübertrager über die gesamte Speicherlänge. Die Solarenergie wird ebenfalls über einen internen Wärmeübertrager in den Speicher eingebracht, der Kessel und die Raumheizung sind direkt an den Speicher angeschlossen. Die blauen Punkte stehen jeweils für normal funktionierende Systemkonfigurationen mit verschiedenen Lasten, Kollektorflächen, Neigungswinkeln und Speichergrößen. Diese Punkte liegen nah an der Korrelationskurve (magentafarbene Linie) – die Systeme erbringen also die erwartete Leistung. Die roten Dreiecke stellen Systeme dar, in die eine TWW-Zirkulation eingebunden wurden (Auslegungs- oder Umsetzungsfehler), was dazu führt, dass der Spei-

cher permanent komplett durchmischt und insgesamt auf einem hohen Temperaturniveau gehalten wird. Hierdurch verringert sich die bereitgestellte solare Wärme erheblich und die roten Dreiecke liegen deutlich unterhalb der Korrelationskurve.



Die beschriebene FSC-Methodik hat den entscheidenden Vorteil, die Bewertung der Funktionalität einer solarthermischen Anlage mit nur einer einzelnen Kennzahl abzubilden. Besonders hervorzuheben ist, dass dabei der tatsächliche Verbrauch und die Auswirkung der Nachheizung berücksichtigt werden. Somit spiegelt sich ein verregneter Sommer nicht in einer schlechten Anlagenbewertung wider, sondern die Kennzahl zeigt trotzdem an, wie gut die Anlage unter den gegebenen Bedingungen funktioniert hat. Mit der entwickelten Methodik wird automatisiert die Aussage getroffen, wie der tatsächliche Solarertrag bezogen auf eine dynamische Referenz zu bewerten ist, sodass Anwender

bzw. Nutzer der Methodik keinerlei Fachkenntnisse oder ein tieferes Anlagenverständnis brauchen.

Durch die monatlichen Energiesummen reagiert diese Anlagenüberwachung jedoch sehr träge und braucht mehrere Monate, um eine Betriebsineffizienz zu melden. Aus diesem Grund wird im Projekt ein weiterer Baustein zur automatischen Funktionskontrolle entwickelt: Die algorithmenbasierte Funktionsüberwachung, die Fehlfunktionen insbesondere einzelner Komponenten sehr schnell entdecken kann.

Geplante Anwender der Ertragskontrolle sind Anlagenbetreiber oder -verantwortliche mit Zugang zu den notwendigen Messdaten bzw. Monitoringportalen oder allgemein Nutzer der Solarthermieanlage. Je nach Implementierung der Bewertungsmethodik kann das Ergebnis der Funktionskontrolle am Regler oder auf der jeweiligen Monitoringplattform angezeigt werden, oder auch den jeweiligen Verantwortlichen per Mail im Falle einer Fehlfunktion informieren.

4.5.2 Arbeitsschritte im Projekt

Die eigentliche Methodenentwicklung im Projekt basiert auf dynamischen Jahressimulationen der Anlagen- und Gebäudetechnik mit der Simulationssoftware TRNSYS. Hierzu wurden im ersten Schritt Standard-Anlagenhydrauliken mit den Industriepartnern im Projekt festgelegt, welche den größten Teil des deutschen Solarthermiemarktes ausmachen. Es wurden sieben Standard-Kombisysteme und ein Trinkwassersystem ausgewählt und in TRNSYS abgebildet.

Der zweite Arbeitsschritt diente der FSC-Korrelationsermittlung. Um herauszufinden, welche Parameter und Komponenten einen großen Einfluss auf die quadratischen Korrelationen haben, wurde eine breite Parametervariation an allen Systemen durchgeführt. Es zeigte sich dabei, dass die ermittelten Korrelationen noch eine große Streuung aufweisen. Um die Genauigkeit der Korrelationen zu verbessern, wurden Korrekturtherme für die einflussreichsten Parameter entwickelt.

Parallel hierzu ist untersucht worden, welche Auswirkungen Messunsicherheiten auf die Ergebnisse haben bzw. welche Sensorik für eine aussagekräftige Leistungsbewertung benötigt wird und welche Zusatzkosten dies verursacht. Diese Aspekte sind für die Implementierung des Verfahrens von entscheidender Bedeutung.

Im Bereich der algorithmenbasierten Funktionskontrolle erfolgt die Entwicklung nach dem vierstufigen Konzept, siehe Abb. 4.5-2. Im ersten Schritt werden die Rohdaten in Messwerte überführt und auf Plausibilität geprüft. Aus Messwerten und weiteren Informationen oder Parametern können Merkmale erzeugt werden (z. B. „Anlage ist in Betrieb“). Symptome zeigen ungewöhnliches Anlagenverhalten an und können aus Merkmalen und/oder Messwerten erzeugt werden. Meist geschieht dies über den Vergleich mit Grenzwerten (z. B. „Temperatur im Solarkreis zu hoch“). In Schritt 4 werden Fehlermeldungen generiert, wenn bestimmte Symptome oder -kombinationen vorliegen.

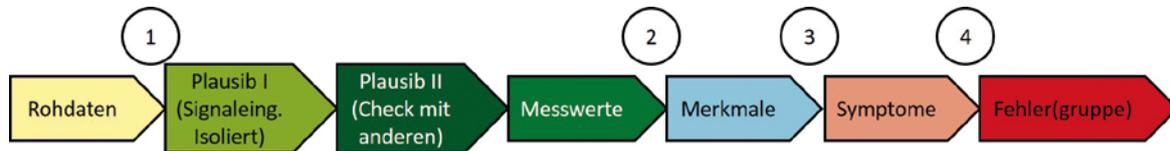


Abb. 4.5-2: Vierstufiges Konzept der algorithmenbasierten Funktionskontrolle [Fachgebiet Solar- und Anlagentechnik, Universität Kassel]

4.5.3 Ergebnisse / Schlussfolgerungen

Korrelationen und Korrekturfunktionen – erreichbare Genauigkeit

Über die Parametervariationen konnte festgestellt werden, dass der TWW-Bedarf, die spezifische Speichergröße und die Größe des Nachheizvolumens sowie die Kesseltemperatur und der Dämmstandard des Speichers einen großen Einfluss auf die Streubreite gegenüber der Korrelation haben, während die Streuung durch unterschiedliche Kombisystemhydrauliken eher vernachlässigbar ist. Werden die System- und Betriebsparameter gleichzeitig variiert, ergibt sich eine deutliche Streuung zwischen der f_{sav} -Vorhersage über die Korrelation und simulierten f_{sav} , siehe Abb. 4.5-3.

Um Einflüsse verschiedener Parameter gleichzeitig erfassen und ausgleichen zu können, wurde ein modifizierter mathematischer Ansatz für die Korrelationen gewählt, in der Korrekturfaktoren über Potenzfunktionen realisiert werden:

$$\hat{f}_{sav} = e^{c_0} \cdot (FSC)^{c_{FSC}} \cdot (X_1)^{c_1} \cdot (X_2)^{c_2} \cdot (X_3)^{c_3} \cdot \dots$$

Dabei bezeichnen die X_i (dimensionslose) Parameter, die den zu beschreibenden Einfluss quantifizieren. Die Exponenten c_i können im logarithmierten Parameterraum durch multiple lineare Regression gewonnen werden. Der Vorteil ist, dass mit Potenzfunktionen auch nichtlineare Korrekturfunktionen gefittet werden können. Wie Abb. 4.5-3 zu entnehmen, verbessert sich durch die Korrekturterme die Vorhersageunsicherheit für den solaren Deckungsanteil von $\pm 26\%$ auf $\pm 12\%$ (für 95 % der enthaltenen Simulationen). Für das Beispielsystem in Abb. 4.5-1 bedeutet das eine Verbesserung der Genauigkeit von $\hat{f}_{sav,use} = (34 \pm 9)\%$ auf $\hat{f}_{sav,use} = (34 \pm 4)\%$.

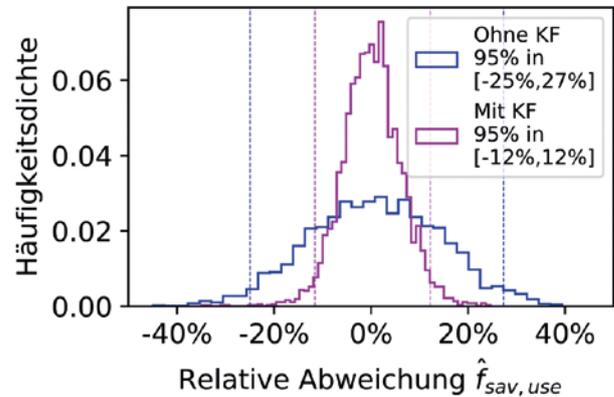
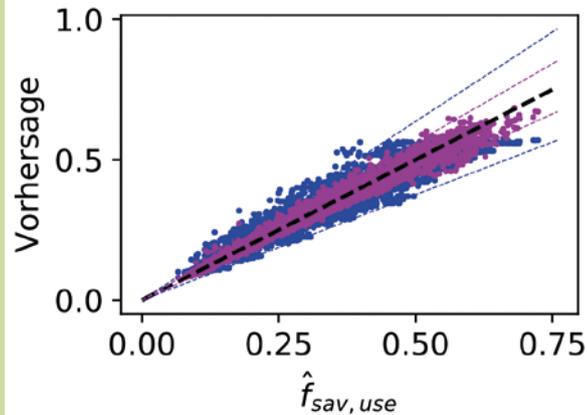


Abb. 4.5-3: Vorhergesagtes und simuliertes $\hat{f}_{sav,use}$ (links) und Verteilungen der relativen Abweichungen (rechts): blau ohne Korrekturterme, magenta mit Korrekturthermen [Fachgebiet Solar- und Anlagentechnik, Universität Kassel]

Einfluss der Messunsicherheiten und Mehrkosten

Bei der Betrachtung der Messunsicherheiten hat sich gezeigt, dass diese einen großen Einfluss auf die Aussagekraft der Methodik haben. Abb. 4.5-4 zeigt eine Korrelation mitsamt des korrelationsinhärenten Unsicherheitsbereichs (magentafarben) von $\pm 12\%$. Zusätzlich sind für drei ausgewählte Systeme die Unsicherheitsbereiche für eine einfache und eine verbesserte Sensorik (rote und grüne Ellipsen) eingezeichnet. Gemessen wird hierbei der Energieverbrauch von Raumheizung und TWW inkl. Zirkulation sowie die vom Kessel an den Speicher gelieferte Energie und die Einstrahlung in Kollektorebene. Die einfache Sensorik (rote Ellipsen) besteht aus Klasse B Temperatursensoren und einfachen Volumenstromsensoren (z. B. Vortex, Unsicherheit 5 % vom Messwert), die Einstrahlung wird aus Satellitendaten geschätzt (Unsicherheit 10 bis 15 %

der Monatssumme). Grün gekennzeichnet ist eine verbesserte Sensorik mit Temperatursensoren der Klasse 1/3 B und geeichten Wasserzählern in Kessel- und Raumheizkreis. Zusätzlich wird die Temperaturdifferenz im TWW-Kreis auch mit Klasse 1/3 B Sensoren gemessen und es kommt ein einfacher Strahlungssensor zum Einsatz.

Wie zu erkennen ist, haben die Beispielsysteme ein simuliertes $f_{sav,sim}$ von 18, 34 und 61 % und FSC_{sim} von 0,39, 0,66 und 0,96. Mit der verhältnismäßig günstigen Sensorik kann die solare Deckungsrate bei $f_{sav,sim}$ von 34 % durch die Messunsicherheiten nur im Bereich von 22 bis 46 % (rote Ellipse, Konfidenzintervall von 95,5 %) angegeben werden. Mit einer solchen Sensorik ist eine Ertragsbewertung nur bei mittleren bis hohen FSC, also bei Systemen mit hohen solaren Deckungsraten aussagekräftig. Mit der verbesserten Sensorik kann die solare Deckungsrate

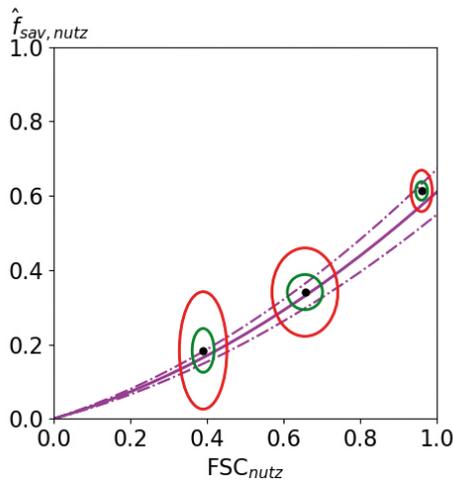


Abb. 4.5-4: Einflüsse Messunsicherheiten im $FSC-f_{sav}$ -Diagramm exemplarisch für drei Systeme: Rote Ellipse = einfache Sensorik und grüne Ellipse = verbesserte Sensorik [Fachgebiet Solar- und Anlagentechnik, Universität Kassel]

von 34 % in einem Bereich von 29 bis 39 % angegeben werden (grüne Ellipse). Hierdurch wäre eine Funktionskontrolle auch bei geringeren solaren Anteilen – also bei typischen Anlagen in Ein- und Zweifamilienhäusern – möglich.

Insgesamt wird für die benötigte Messtechnik mit mehreren Hundert Euro gerechnet. Dies übersteigt jedoch das Messtechnik-Budget kleinerer Anlagen. Daher empfiehlt sich die FSC-basierte Systemeffizienzbewertung zunächst für größere Anlagen.

Algorithmenbasierte Fehlerdetektion und -diagnose (FDD)

Neben der FSC-basierten Leistungsbewertung wird in SolarCheck eine algorithmenbasierte FDD entwickelt. Die modulare und größtenteils komponentenorientierte Software setzt sich aus Einzelalgorithmen der jeweiligen Stufen (siehe Abb. 4.5-2)

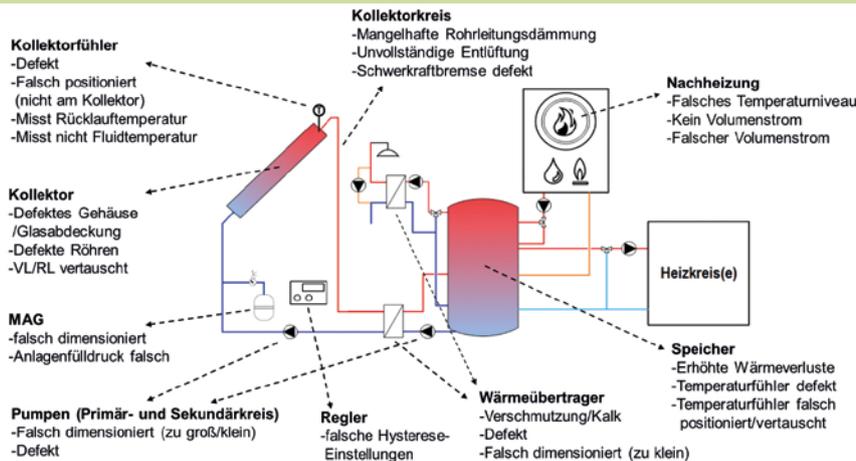


Abb. 4.5-5: Priorisierte Fehlerliste eines solarunterstützten Heizungssystems [Fachgebiet Solar- und Anlagentechnik, Universität Kassel]

zusammen und passt sich automatisch an die vorhandene Sensorik an. Hiermit können gravierende Anlagenfehler, die zu einem Komplettausfall der Anlage führen oder den Solarertrag deutlich beeinträchtigen, schnell und direkt gemeldet werden. Die differenzierte Auswertung auftretender Symptomkombinationen ermöglicht es idealerweise zusätzlich, den Fehler einzugrenzen oder zu diagnostizieren, welche Komponente defekt ist.

Im Projekt wurde zunächst in Zusammenarbeit mit den Industriepartnern eine Fehlerliste für das gesamte solarunterstützte Heizungssystem erstellt. Diese beinhaltet ca. 80 mögliche Fehlerbilder und ist damit deutlich umfangreicher als z. B. die Fehlerliste der VDI 2169 mit ca. 40 Einträgen. Die Fehler wurden dann nach Auftretenshäufigkeit und Auswirkungen auf das System bzw. die Systemeffizienz bewertet, um die Algorithmenentwicklung mit einer priorisierten Fehlerliste zu strukturieren.

Abb. 4.5-5 zeigt die priorisierte Fehlerliste zur Veranschaulichung anhand eines Anlagenschemas.

Wir bedanken uns für die Unterstützung beim BMWi (FKZ 0325870A/B) und dem PtJ, bei dem wiss. Partner CEA INES sowie bei den Projektpartnern Bosch Solarthermie, Enertracting, RESOL, SOLVIS, Vaillant, Viessmann Werke und WILO.

Literatur:

- [1] Frommholz, D., Linkiewicz, M., Meißner, H., Dahlke, D., Reconstructing Buildings with Discontinuities and Roof Overhangs from Oblique Aerial Imagery, International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives, XLII-1 (W1) (2017), 465-471.

Kontakt:

Universität Kassel
Institut für thermische Energietechnik
solar@uni-kassel.de

Christoph Schmelzer, M.Sc.

Dipl.-Phys. Matthias Georgii

Dr.-Ing. Janybek Orozaliev

Dr.-Ing. Oleg Kusyy

Univ.-Prof. Dr. Klaus Vajen

Universität Stuttgart
Institut für Gebäudeenergetik,
Thermotechnik und Energiespeicherung
pm@igte.uni-stuttgart.de

Natalie Bonk, M.Sc.

Dr.-Ing. Harald Drück

4.6 Gebäudehülle: Textil-KFFS–Bewertung textiler Sonnenschutzkomponenten

Im Verbundprojekt „Textil-KFFS: Entwicklung von schaltbaren textilen Fassadenkomponenten mit verbesserten Bewertungsmethoden“ stehen die experimentelle Bestimmung von gerichtet-gerichtet- und gerichtet-hemisphärischer Licht- und Strahlungstransmission und -reflexion von textilbasierten Sonnenschutzkomponenten und die daraus simulierte Bestimmung der Auswirkung von komplexen Fenster- und Fassadensystemen (KFFS) auf Tageslichtversorgung, Blendung und Überhitzung im Gebäude im Fokus.

Typische angewendete und genormte Messverfahren zur optischen und thermischen Charakterisierung von Sonnenschutzbauteilen wie EN14500:2008 [1] vernachlässigen die strukturell bedingte starke Richtungsabhängigkeit der lichttechnischen Eigenschaften von Textilien. Dies kann bei der Anwendung von als geeignet getesteten Textilien problematisch sein. Die Richtungsabhängigkeit kann bei passender Auslegung der Textilstruktur dagegen auch für bessere Sonnenschutzsysteme genutzt werden. Das ist nur möglich, wenn die Richtungsabhängigkeit messtechnisch ausreichend genau beschrieben werden kann. Einige der Messmethoden, die im Rahmen vom Forschungsvorhaben Textil-KFFS entwickelt wurden, sind bei der Überarbeitung der oben genannten Normen aufgenommen und dort ausführlich beschrieben worden [2].

Über den Stand der Technik der überarbeiteten Produktnormen hinaus geht die Verwendung von bidirektionalen Streuverteilungsfunktionen (engl. bidirectional scattering distribution function, BSDF), welche die räumliche Verteilung der transmittierten bzw. reflektierten Strahlung einfallungsrichtungsabhängig darstellen. Die räumliche Auflösung ist deutlich höher als bei den bisher europäisch normierten Methoden möglich. Über Strahlverfolgungsprogramme wie RADIANCE lassen sich die BSDF-Werte verwenden, um die Wechselwirkung von Licht und Solarstrahlung aus verschiedenen Himmelsregionen einschließlich der Sonne mit vielen verschiedenen Fassadenkomponenten zu berechnen und daraus Tageslichtverteilung und Blendungsgefahr im Innenraum zu bestimmen [4]. Dies gilt insbesondere für gängige Fassadenkomponenten wie nichtstreuende Verglasungen und die meisten textilen Sonnenschutzkomponenten. Darüber hinaus werden die BSDF-Werte vieler lichtstreuenden Verglasungs- und Sonnenschutzkomponenten als Eingangsgrößen für das weit verbreitete WINDOW-Programm von LBNL angenommen, um z. B. die optischen und thermischen Eigenschaften von komplexen Fenster- und Fassadensystemen zu charakterisieren [5]. Mit den gleichen Eingangsgrößen lässt sich mit Hilfe des Programms EnergyPlus die Raumsituation licht- und energietechnisch bewerten [6]. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass es international einen Trend gibt, höher aufgelöste Kenngrößen für die Charakterisierung von KFFS zu verwenden.

4.6.1 Arbeitsschritte im Projekt Textil-KFFS

Transmissionsmessungen an Sonnenschutztextilien mit unterschiedlichen Messgeräten

Transmissionsmessungen an Textilien mit unterschiedlichen Messapparaturen und vor allem die Ergebnisse der daraus ermittelten gerichtet-hemisphärischen und gerichtet-gerichteten Lichttransmissionsgrade wurden miteinander verglichen. Die folgenden Messapparaturen wurden bei diesem Vergleich einbezogen:

- UV/VIS/NIR-Spektrometer (am Fraunhofer ISE): Zweistrahlenspektrometer mit Doppelmonochromator zur Bestimmung des Transmissions- bzw. Absorptionsgrads einer Probe im Wellenlängenbereich 185 – 3300 nm gemäß Kapitel 6.5.5 von [2].
- TAUWIN-Ulbrichtkugel (am Fraunhofer ISE): Einstrahlmessgerät entsprechend Kapitel 6.5.4 von [2].
- Ulbrichtkugel (an den DITF): Sequentielles Zwei-Strahl-Messverfahren zur Bestimmung von $\tau_{\text{dir-h}}$ und $\tau_{\text{dir-dif}}$ gemäß Kapitel 6.5.6 von [2].
- Messaufbau zur Messung von $\tau_{\text{dir-dir}}$ (an den DITF): Diffuse Lichtquelle, die über eine emittierende Fläche eine gleichförmige Leuchtdichte erzeugt, elektronische, hochpräzise Drehbühne mit Probenhalter und Dioden-Array-Spektrometer mit Lichtleiter und Kollimatorlinse mit einem Betrachtungswinkel von 10° gemäß Kapitel 7.4.1 und 7.4.2 von [2].
- Imaging Sphere IS-SA (an den DITF): Halbkugel mit einer diffus reflektierenden Beschichtung,

einem konvexen Spiegel sowie einer Probenöffnung und mehreren Öffnungsklappen für die Beleuchtung zur Bestimmung der BSDF.

- 3D-Scanning-Gonio-Photometer pab-pgII (am Fraunhofer ISE): Messung der Lichtabstrahlung einer Probe durch einen mechanisch um die Probe bewegten Detektor zur Bestimmung der BSDF [7].

Vergleich der Messergebnisse einschließlich Entwicklung geeigneter Metriken

Für die grundlegenden Eigenschaften bei senkrechtem Lichteinfall wie den normal-hemisphärischen und den normal-normalen Transmissionsgrad eignen sich die statistischen Größen Mittelwert und Standardabweichung zur Beschreibung der Güte der Übereinstimmung. Bei den Messreihen mit unterschiedlichen Messgeräten an den vom Projektpartner ETTLIN bereitgestellten Textil- und Laminatproben lagen die Standardabweichungen für die Lichttransmissionsgrade bei senkrechtem Lichteinfall regelmäßig unter 0,005 bei Mittelwerten, die zwischen 0,05 und 0,30 lagen. Die Werte der Standardabweichung für normal-normale Transmissionsgrade sind typischerweise etwas kleiner als für normal-hemisphärische Transmissionsgrade. Wichtig dabei ist, dass der Raumwinkelbereich, der für die Bestimmung von der „normalen“ (= senkrecht gerichteten) Richtung verwendet wird, in den unterschiedlichen Geräten übereinstimmend definiert wird. Für die hier verwendeten Messgeräte ist diese Quelle der Unsicherheit inzwischen eingegrenzt worden.

Tabelle 4.6-1: Merkmale der untersuchten Testmethoden

Testmethode/ Merkmal	Bestimmung des gerichtet- gerichteten Transmissionsgrads $\tau_{dir-dir}$ von textilem Sonnenschutz			Bestimmung des gerichtet-hemi- sphärischen Trans- missionsgrads τ_{dir-h} von textilem Sonnenschutz		Bestimmung der Licht- BSDF und des winkelabhängigen g-Werts von KFFS
Art der Bewer- tungsmethode	experi- mentell	experi- mentell	experi- mentell	experi- mentell	experi- mentell	simulationsbasiert
Grundlagen: Eingangsgrößen	τ_{dir-h} und $\tau_{dir-dif}$ von Ulbricht- kugel (ggf. pullback)	BSDF	$\tau_{dir-dir}$	τ_{dir-h} von Ulbricht- kugel	BSDF	$\tau_{dir-dir}$, τ_{dir-h} , BSDF, KFFS-Geometrie, U-Wert
Ermittelte Kennwerte	$\tau_{dir-dir}$			τ_{dir-h}		Licht-BSDF und winkelabhängiger g-Wert von KFFS
Geplante Anwender	Sonnenschutzhersteller, Tageslicht- und Gebäudeplaner					Tageslicht- und Gebäudeplaner

Schwieriger wird der Vergleich, wenn sowohl der Einfallswinkel wie ggf. auch der Ausfallwinkelbereich – wie bei gerichtet-hemisphärischen und -gerichteten Transmissionsgraden und der BSDF – variiert werden, weil es eine Vielzahl von Messgrößen zum Vergleich gibt. Für die Charakterisierung der Textilien haben sich Fraunhofer ISE und DITF auf einen Standardwinkelsatz für die Einfallswinkel von $\theta = 8^\circ, 30^\circ$ und 60° und $\varphi = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ, 180^\circ, 215^\circ, 270^\circ$ und 315° geeinigt (siehe Abb. 4.6-1 für die Definition dieser Winkel). Bei asymmetrischen Proben kann es sein, dass der „wahre“ gerichtet-hemisphärische oder gerichtet-gerichtete Transmissionsgrad bei jedem dieser 24 Einfallswinkel tatsächlich unterschiedlich ist. Für den Vergleichszweck wird deshalb der Weg gewählt, von zwei Messgeräten paarweise

bei jedem Einfallswinkel die Differenz der Messgrößen zu bilden, wie in Tabelle 4.6-2 dargestellt. Über jede θ -Reihe und φ -Spalte werden dann die Mittelwerte, Standardabweichungen und Betrags-Mittelwerte gebildet. Diese Metriken erlauben es, schnell Muster bei „Ausreißern“ zu erkennen.

Für die in Tabelle 4.6-2 dargestellten Ergebnisse für eine Glas-Textil-Laminatprobe ist durchgehend eine gute Übereinstimmung der nach recht unterschiedlichen Methoden gemessenen Größen festzustellen. Ähnliche Tabellen für manche Textilproben zeigten z. B. Abweichungen bei $\theta = 60^\circ$, die sich oft auf die Probenhalterung (Ebenheit, Abschattung) oder sich schnell ändernde Transmissionsgrade mit dem φ -Winkel zurückführen ließen. Inzwischen wurde die Probenhalterung an den beiden BSDF-Mess-

Tabelle 4.6-2: Paarweise Differenzen, Mittelwerte, Standardabweichung (Sigma) und Betrags-Mittelwerte für gerichtet-hemisphärische Transmissionsgrade eines Glas-Textil-Laminats aus photogoniometrischen Messungen an den DITF (imaging sphere IS-SA) und Fraunhofer ISE (3D-scanning photogoniometer pglI). Die Reihenüberschriften sind die θ -Einfallswinkel („klassische“ Einfallswinkel mit Bezug auf die Probennormale), die Spaltenüberschriften die φ -Einfallswinkel (Drehung der Probe innerhalb der eigenen Ebene).

FG379006t	0°	45°	90°	135°	180°	225°	270°	315°	Mittelwert	Sigma	Betrags-MW
8°	-0.004	-0.006	-0.009	-0.005	-0.009	-0.008	-0.005	-0.006	-0.006	0.002	0.006
30°	-0.003	-0.004	-0.006	-0.003	-0.007	-0.002	-0.004	-0.003	-0.004	0.001	0.004
60°	0.000	-0.001	-0.004	0.003	0.001	0.003	-0.002	0.000	0.000	0.002	0.002
Mittelwert	-0.003	-0.004	-0.006	-0.002	-0.005	-0.002	-0.003	-0.003			
Sigma	0.002	0.002	0.002	0.003	0.004	0.005	0.001	0.003			
Betrags-MW	0.003	0.004	0.006	0.004	0.006	0.005	0.003	0.003			

geräten verbessert; die probeninhärenten Schwierigkeiten bei steilen Gradienten in der Winkelabhängigkeit der Transmissionsgrade lassen sich bei Bedarf durch Messungen mit einer feineren Winkelauflösung erkennen und gegebenenfalls beheben.

Eingrenzung von Mess- und Auswerteparametern

Um die Winkelabhängigkeit der optischen Eigenschaften einer textilen Probe eindeutig angeben zu können, ist deren Ausrichtung bei der Messung zu definieren. Deswegen wird eine Winkelkonvention eingeführt, die sich auf eine auf die Probe eingezeichnete Bezugsrichtung und die beleuchtete Probenoberseite bezieht. Für die meisten Proben macht es dabei Sinn, die Produktionsrichtung als Bezugsrichtung zu verwenden, um die Bezugsrichtung für spätere Produktionschargen wiederfinden zu können. Die Bezugsrichtung wird als die positive Richtung der x-Achse innerhalb eines fest zur Probe stehenden,

kartesischen Koordinatensystems mit mathematisch positivem Drehsinn definiert. Die y-Achse liegt in Richtung der Probenfläche, wodurch die z-Achse normal auf der Probenfläche steht. Die z-Achse hat positive Werte oberhalb der Probenoberseite. In diesem Koordinatensystem lassen sich mit dem Höhenwinkel θ im Bezug zur positiven z-Achse und dem Drehwinkel φ innerhalb der xy-Ebene alle möglichen Beleuchtungsrichtungen beschreiben. Dabei definieren die beiden Einfallswinkel die Beleuchtungsrichtung der Probe. $\theta = 0^\circ$ liegt auf der positiven z-Achse und $\varphi = 0^\circ$ liegt in Bezugsrichtung. Ebenfalls lassen sich die Ausfallswinkel innerhalb dieses Koordinatensystems definieren. Gedanklich wird immer die Lichtquelle bzw. der Detektor um die Probe bewegt, nicht andersrum. Abb. 4.6-1 zeigt die Winkelkonvention bei Beleuchtung der Probenoberseite und der Probenrückseite.

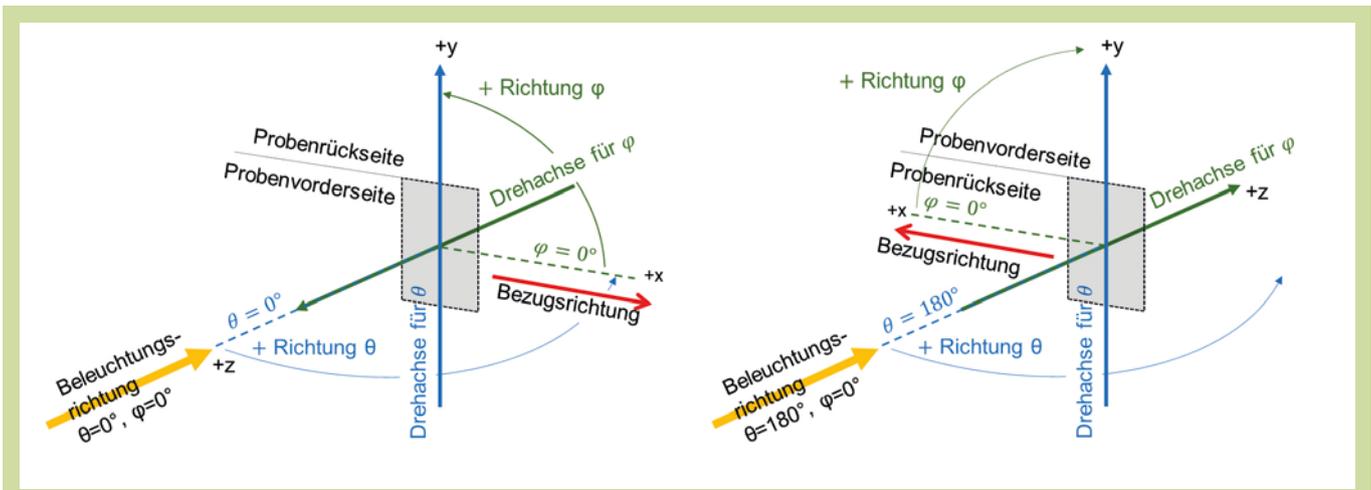


Abb. 4.6-1: Winkelkonvention für die Beleuchtungsrichtung von Textilproben [DITF]

Für die Unterscheidung zwischen dem „gerichteten“ und „diffusen“ Anteil der transmittierten oder reflektierten Strahlung muss der Raumwinkel um den betrachteten Ausfallswinkel definiert werden, der die Grenze zwischen den beiden Anteilen bestimmt. In einer Ulbrichtkugel wird dieser Raumwinkel in erster Linie durch das Verhältnis der Fläche der Apertur, der für den Auslass der „gerichteten“ Strahlung geöffnet wird, und der Kugelinnenoberfläche bestimmt. In [2], Kapitel 6.5.3.2 wird aufgrund von Untersuchungen am Fraunhofer ISE die Begrenzung dieses Verhältnisses auf Werte zwischen 0,0035 und 0,004 empfohlen. Von einem Satz an BSDF-Werten lässt sich der gerichtet-gerichtete Transmissions- oder Reflexionsgrad durch Integration über einen gegebenen Raumwinkel berechnen, der durch die Richtung der Hauptachse eines Kegels und seinem Halbwinkel definiert wird. Halbwinkelwerte zwischen etwa 3° und 5° wurden für die beiden Photogoniometer (pgII und IS-SA) ex-

perimentell bestimmt.

Ein weiterer Parameter, der ggf. bei der Messung von winkelabhängigen optischen Größen berücksichtigt werden soll, ist der Polarisationsgrad der Strahlung. Inwieweit Polarisation bei der Bestimmung von Transmissions- und Reflexionsgraden einer Probe berücksichtigt werden muss, hängt zuerst davon ab, ob es für den Anwendungszweck reicht, dass die optischen Größen das Probenverhalten für nicht-polarisierte Strahlung (mit gleichen Anteilen von s- und p-Polarisation) richtig bekannt sind, oder ob die Größen für s- und p-polarisierte Strahlung getrennt benötigt werden. Letzteres gilt z. B. im Kontext von komplexen Fenster- und Fassadensystemen, wenn eine schräg bestrahlte Glasscheibe einer Textilschicht vorgeschaltet ist oder die Wechselwirkung mit teilpolarisiertem Himmelslicht von Interesse ist. Entscheidungsbäume für den ersten und den zweiten Fall wurden von Fraunhofer ISE aufgestellt (siehe Abb. 4.6-2). Hierbei wird angenommen, dass

der Detektor nicht polarisationsempfindlich ist. Bei den untersuchten textilen Proben wurden Differenzen zwischen den Transmissionsgraden für s- und p-polarisiertem Licht bei einer gegebenen Probe und gegebenem Einfallswinkel (θ -, φ -Paare) von bis zu 10 % relativ festgestellt.

Bereitstellung winkelabhängiger Größen komplexer Fenster- und Fassadensysteme

Analog zu den optischen Eigenschaften lassen sich die thermischen Eigenschaften von Fassaden- und Fenstersystemen durch den U-Wert und den winkelabhängigen g-Wert (nordamerikanisch: DSHGC) charakterisieren. Der winkelabhängige g-Wert ist ein Maß für den Gesamtanteil der einfallenden Sonneneinstrahlung, der durch ein Fenstersystem

für verschiedene Einfallrichtungen in das Gebäude übertragen wird. Für jede einfallende Strahlungsrichtung besteht der winkelabhängige g-Wert aus zwei Teilen, dem gerichtet-hemisphärischen Strahlungstransmissionsgrad und dem sekundären Wärmeabgabegrad nach innen q_i [8]. Der U-Wert und der winkelabhängige g-Wert können als Eingangsgrößen für ein Modell wie das von Kuhn [9] verwendet werden, um die Übertragung von Sonnenenergie und Wärme durch Fenstersysteme angemessen darzustellen.

Die BSDF und der winkelabhängige g-Wert von Fenstersystemen (Verglasung + Sonnenschutz) sind weder in Datenbanken noch in Katalogen von Herstellern direkt verfügbar, da es nicht möglich ist, alle möglichen Kombinationen von Verglasungen und

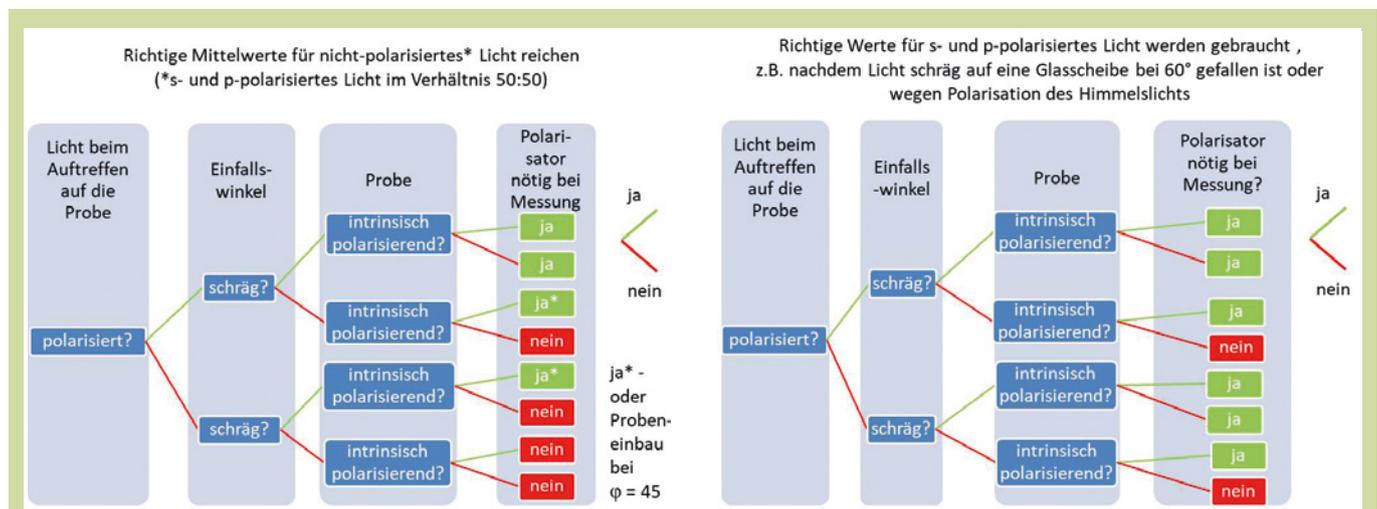
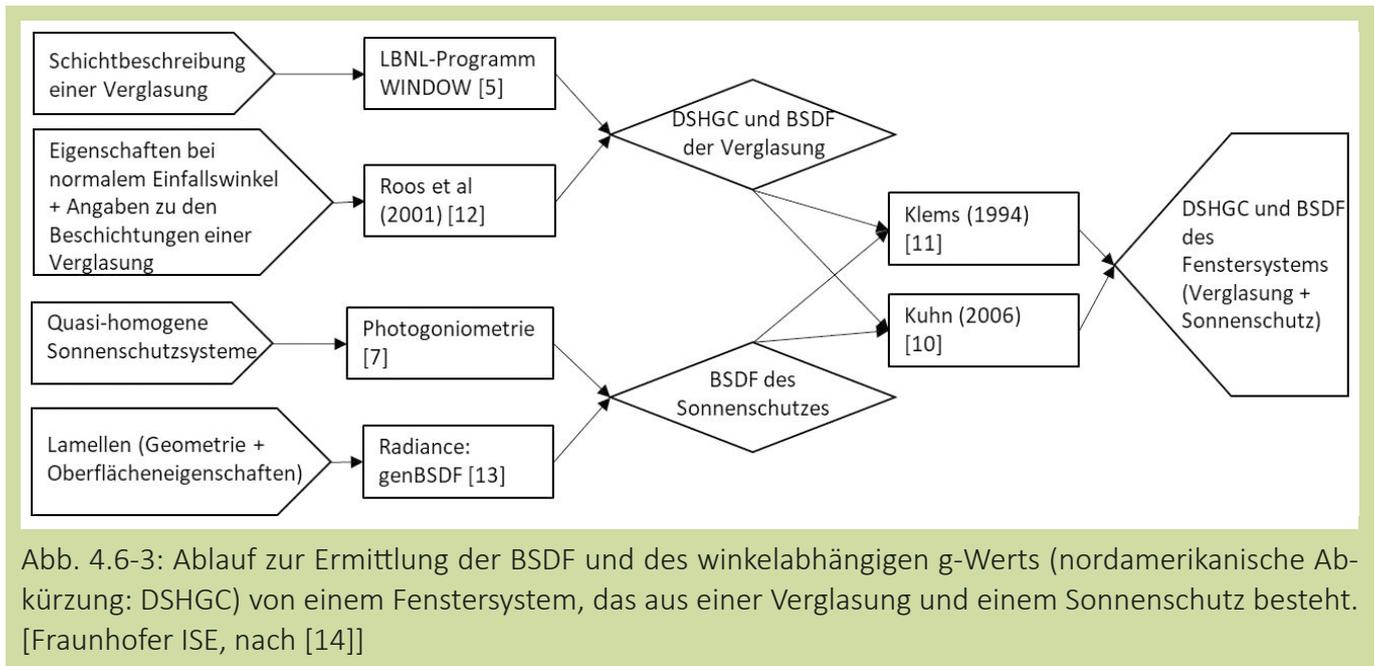


Abb. 4.6-2: Entscheidungsbaum zur Notwendigkeit von Polarisatoren zwischen Lichtquelle und Probe bei winkelabhängigen Messungen von Transmissions- und Reflexionsgraden. Links: wenn richtige Mittelwerte für vollständig nichtpolarisiertes Licht ausreichen (Licht mit Polarisationsgrad = 0); rechts: wenn richtige Werte für s- und p-polarisiertes Licht getrennt benötigt werden [Fraunhofer ISE]



Sonnenschutz, die für ein Gebäude vorkommen könnten, experimentell zu charakterisieren. Diese Datensätze müssen also aus den individuellen optischen und thermischen Eigenschaften von Verglasungen und Beschattungseinrichtungen ermittelt werden. Eine Kombination aus experimentellen Methoden, wie oben geschildert, und Simulationstechniken ist oft der wirtschaftlichste Ansatz, um die Datensätze zu erhalten. Einige zu diesem Zweck entwickelte analytische und experimentelle Methoden sind in Abb. 4.6-3 zusammengefasst. Geeignete Methoden zur Bestimmung der BSDF verschiedener Einzelkomponenten sind in der zweiten "Spalte" dort aufgeführt [5, 7, 12, 13]. Der winkelabhängige g-Wert eines Fenstersystems (Verglasung + Sonnenschutz) wird aus dem winkelabhängigen g-Wert und der solaren BSDF der Verglasung und der solaren

BSDF des Sonnenschutzes nach Kuhns Modell berechnet [10].

Anschließend wird mit der Klems-Methode [11] die Licht-BSDF des Systems aus der Licht-BSDF der Verglasung und der Licht-BSDF des Sonnenschutzes berechnet.

4.6.2 Schlussfolgerungen

Verschiedene Messapparaturen wurden im Verbundprojekt Textil-KFFS verwendet, um die winkelabhängigen optischen Eigenschaften von Sonnenschutztextilien zu charakterisieren. Durch die Definition einer Winkelkonvention mit einer eindeutigen Bezugsrichtung der Probe, eine Schärfung der räumlichen Grenze zwischen „gerichteten“ und „diffusen“ Strahlungsanteilen bei den betrachteten

Messapparaturen und die Beachtung der Polarisation wurde eine gute Übereinstimmung bei den Messgrößen mit unterschiedlichen Messansätzen erzielt. Entsprechend dem dargestellten Arbeitsablauf werden die Licht- und solaren BSDF der Textilien und Verglasungen mit Simulationstools miteinander verknüpft, um die winkelabhängigen Eigenschaften von komplexen Fenster- und Fassadensystemen zu berechnen. Daraus können unter anderem Tageslichtverteilung, Blendungsgefahr und Überhitzungsrisiko im Innenraum bestimmt werden. Mit den beschriebenen Ansätzen leistet dieses Projekt einen Beitrag zur größeren Genauigkeit und Vergleichbarkeit beim internationalen Trend, höher aufgelöste Kenngrößen für die Charakterisierung von KFFS zu verwenden.

Das Projekt Textil-KFFS mit dem Förderkennzeichen 03ET1432 wurde durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Literatur:

- [1] EN 14500:2008, Abschlüsse – Thermischer und visueller Komfort – Prüf- und Berechnungsverfahren, CEN, Brüssel.
- [2] EN 14500:2020, Abschlüsse – Thermischer und visueller Komfort – Prüf- und Berechnungsverfahren, CEN, Brüssel.
- [3] ASTM, E2387-05: Standard Practice for Goniometric Optical Scatter Measurements, ASTM International, West Conshohocken, PA (2005).
- [4] Ward, G., Mistrick, R., Lee, E., McNeil, A., Jonsson, J., Simulating the daylight performance of complex fenestration systems using bidirectional scattering distribution functions within radiance, J. Illum. Eng. Soc. N. Am. 7 (4) (2011), 1–19.
- [5] <https://windows.lbl.gov/software/window>
- [6] <https://energyplus.net>
- [7] Apian-Bennewitz, P., New scanning goniophotometer for extended BRDF measurements, in: Proc. SPIE 7792, Reflection, Scattering, and Diffraction from Surfaces II, September 2010.
- [8] Kuhn, T. E., Buehler, C., Platzer, W. J., Evaluation of overheating protection with sun-shading systems, Solar Energy 69 (2001), 59- 74.
- [9] Kuhn, T. E., Herkel, S., Frontini, F., Strachan, P., Kokogiannakis, G., Solar control: a general method for modelling of solar gains through complex facades in building simulation programs, Energy Build. 43 (1) (2011), 19–27.
- [10] Kuhn, T. E., Solar control: A general evaluation method for facades with venetian blinds or other solar control systems, Energy and Buildings 38 (6) (2006), 648 – 660.
- [11] Klems, J., A new method for predicting the solar heat gain of complex fenestration systems: I. Overview and

derivation of the matrix layer calculation, American Society of Heating, Refrigerating and Air- Conditioning Engineers Transactions 100 (1) (1994) 1065–1072.

- [12] Roos, A., Polato, P., van Nijnatten, P. A., Hutchins, M. G., Olive, F., Anderson, C., Angular-dependent optical properties of low-e and solar control windows: Simulations versus measurements, Solar Energy 69, Supplement 6 (0) (2001), 15 – 26.
- [13] McNeil, A., Jonsson, C., Appelfeld, D., Ward, G., Lee, E., A validation of a ray-tracing tool used to generate bi-directional scattering distribution functions for complex fenestration systems, Solar Energy 98, Part C (0) (2013), 404 – 414.
- [14] Bueno, B., Cejudo-Lopez, J.M., Kuhn, T.E., A general method for the evaluation of the thermal impact of complex fenestration systems in building zones, Energy and Buildings 155 (2017), 43–53.

Kontakt:

Fraunhofer ISE
Energy-Efficient Buildings

Dr. Helen Rose Wilson
helen.rose.wilson@ise.fraunhofer.de

Dr. Bruno Bueno
bruno.bueno@ise.fraunhofer.de

DITF
Technologieintegration

Dipl.-Ing. Bastian Baesch
Bastian.Baesch@ditf.de

Dipl.-Ing. (FH) Holger Illg
Holger.Illg@ditf.de

4.7 Kurzzeitmessung: Gtom – Energetische Analyse von Gebäudehüllen

Die energetische Bewertung von Bestandsgebäuden erfolgt in der Praxis heute in der Regel mithilfe der Begehung eines Gebäudes durch einen Experten. Er erfasst dabei die Bauteile sowie zentrale Eigenschaften der Gebäudetechnik und ordnet statische Nutzungskennwerte zu. Die bauphysikalischen Eigenschaften, wie die Lambda- oder U-Werte, werden in der Regel unter der Verwendung von Tabellenwerten oder einer Typologie ermittelt. Im Wohngebäudebereich ist hierfür die TABULA-Typologie weit verbreitet. Darüber hinaus werden Materialdatenbanken und Erfahrungswerte für die Schätzung der genauen Wandaufbauten verwendet. Die Nutzung von Typologiewerten ist ein schnelles und günstiges Verfahren, das auch die energetische Bewertung einer größeren Anzahl an Gebäuden in kurzer Zeit ermöglicht, erfasst aber nicht die individuellen Eigenschaften eines zu sanierenden Gebäudes. Begehungen mit weitergehenden Untersuchungen bedeuten insbesondere bei größeren Gebäuden einen hohen Zeit- sowie Personalaufwand und dadurch hohe Kosten. Die Qualität der energetischen Bewertung ist dabei stark von der Erfahrung des jeweiligen Experten sowie der bauwerksindividuellen Diskrepanz zwischen Planung und Ausführung abhängig. Ferner können zerstörungsfrei kaum detailliertere Informationen über nicht zugängliche Strukturen gewonnen werden.

Im Projekt Gtom werden daher Messverfahren erprobt und weiterentwickelt, die dazu dienen sollen, in kurzer Zeit die bauwerksindividuellen geometri-

schen, physikalischen und strukturellen Eigenschaften eines Gebäudes zu erfassen. Auf diese Weise soll zu überschaubaren Kosten eine wesentlich besser auf das individuelle Bauwerk angepasste Sanierungsplanung durchgeführt werden können. Perspektivisch können dieselben Messverfahren auch zur Qualitätskontrolle nach Sanierungen und bei Neubauten eingesetzt werden.

4.7.1 Merkmale der Testmethode

Die im Projekt Gtom angewendeten und weiterentwickelten Messverfahren haben gemeinsam, dass sie berührungslos und zerstörungsfrei arbeiten. Sie werden zum Teil seit vielen Jahren und Jahrzehnten im Bereich der Fernerkundung und Sicherheitstechnik entwickelt, aber auch neue Verfahren für diese Anwendung werden erforscht. In diesem Projekt werden sie nun zusammengebracht und darauf untersucht, welche Informationen sie über bautechnisch und energetisch relevante Eigenschaften von Gebäudehüllen liefern können. Die Vielzahl von Verfahren reicht von Photogrammetrie basierend auf Luft- oder Satellitenaufnahmen über thermische Infrarotmessungen zu terrestrischem Radar.

Mit diesen Messverfahren kann zunächst einmal die Geometrie von einzelnen Gebäuden, aber auch von sämtlichen Gebäuden eines Quartiers ermittelt werden. Darüber hinaus werden bauphysikalische Eigenschaften (insbes. U-Werte) bestimmt. Auch Informationen über die genaue Struktur der Gebäudehülle, wie den Schichtaufbau der Wände und ihre Materialien, lassen sich ableiten.

Daten aus den verschiedenen Messverfahren wer-

den in einem digitalen Gebäude- oder Quartiersmodell zusammengeführt. Dieses kann zur weiteren Sanierungsplanung genutzt werden. So entsteht ein Werkzeugkasten an Messmethoden, die zentrale Informationen für die Energieberatung liefern. Sie können darüber hinaus auch von Handwerksbetrieben genutzt werden, um ihre Leistungen planen und anbieten zu können. Letztendlich dienen sie dazu, qualitativ hochwertige Informationen über existierende Gebäude zu liefern, die an verschiedenen Stellen im Sanierungsprozess benötigt werden, und sollen so auch die Verwendung digitaler Werkzeuge sowie die Anwendung von BIM im Bestand stärken.

4.7.2 Arbeitsschritte im Projekt

Im Projekt werden eine Vielzahl Ansätze zur Nutzung von Fernerkundungsmethoden für die energetische Charakterisierung von Gebäudehüllen untersucht. Die Ergebnisse werden mit konventionellen Messmethoden, durchgeführt vom Solar-Institut Jülich, verglichen. Im Folgenden werden einige dieser Ansätze im Detail vorgestellt.

3D-Rekonstruktion der Gebäudehülle

Sowohl für ein großstädtisches Quartier als auch für ein Versuchsgebäude, das ein freistehendes Einfamilienhaus ist, wurden im Projekt Arbeitsabläufe und Algorithmen getestet, um aus Luftbildern 3D-Modelle im CityGML-Format zu generieren. Die zugrundeliegenden Luftbilder wurden für das Quartier aus einem Kleinflugzeug und für das Einfamilienhaus mit einem UAV (unbemanntes Luftfahrzeug) aufgenommen. Abb. 4.7-1 zeigt beispielhaft die Er-

gebnisse. Hierbei wird in einem ersten Schritt aus den Luftbildern photogrammetrisch eine Punktwolke erzeugt. Dies kann mithilfe vom DLR entwickelter oder kommerzieller Software erfolgen. Der daran anschließende vollautomatische Arbeitsablauf nutzt komplett vom DLR entwickelte Programme. Mit Algorithmen zu Projektion, Verschneidung und Flächenwachstum [1] wird zunächst die Geometrie der Gebäudehülle rekonstruiert und das Dach einschließlich Dachüberständen von den Fassaden unterschieden. Nach verschiedenen Kriterien wird außerdem für jede Fassade das Luftbild ausgewählt, das die beste Darstellung der Fassade beinhaltet. Hierauf können mit Segmentierungsverfahren ähnlich dem in [2] oder mit künstlichen neuronalen Netzen Fenster und Türen erkannt werden.

Am untersuchten Einzelgebäude, das eine sehr einfache Geometrie und Konstellation an Fenstern aufweist, wurde die derzeitige Genauigkeit des Ansatzes untersucht. Als Referenz wurde ein terrestrischer Laserscan des Gebäudes durchgeführt. Dieser hat für die Nordwand eine Länge von 9,48 m und eine Neigung von $90,27^\circ$ ergeben. Führt man eine bekannte Referenzlänge ein, kann eine Punktwolke erzeugt werden, die eine Länge von 9,46 m für die Nordwand und eine Neigung von $90,35^\circ$ ergibt. Die Fenstererkennung lieferte eine Erkennungsrate von 79 %, wobei aber keine unkorrekten Deklarationen von Fenstern vorkamen. Dass nicht alle Fenster korrekt erkannt wurden, liegt an einer teilweisen Verdeckung durch die Dachüberstände auf den aufgenommenen Luftbildern [3].

Für das Quartier ist eine solche quantitative Genauigkeitsanalyse nur stichprobenartig möglich. Es

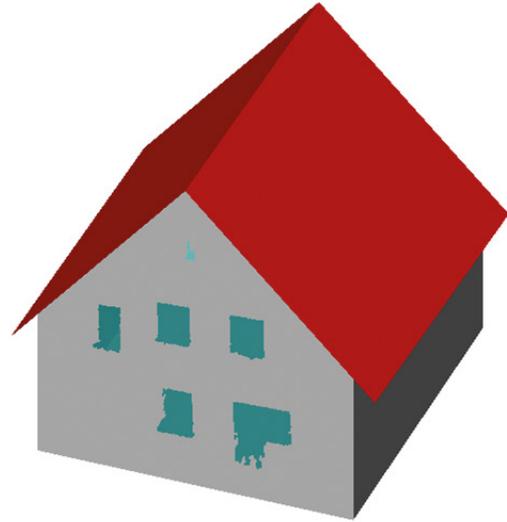
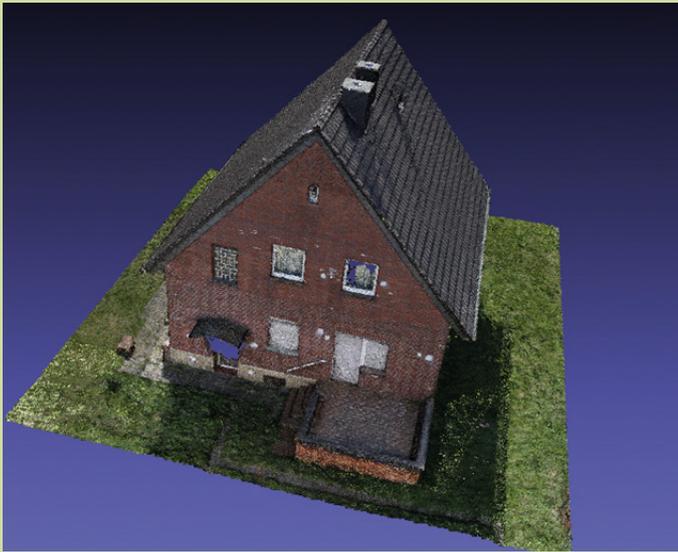


Abb. 4.7-1: Links: Photogrammetrisch erzeugte Punktwolke; rechts: Daraus errechnetes 3D-Flächenmodell [DLR]

zeigt sich, dass bei Gebäuden mit komplexen Geometrien, insbesondere Dachaufbauten, die geometrische Rekonstruktion z. T. noch fehlerhaft ist. Die Fenstererkennung funktioniert nicht bei allen Fassaden gleich gut, liefert allerdings ähnliche Ergebnisse wie eine manuelle Messung in GoogleEarth. Fehler in der Fenstererkennung liegen hier insbesondere an der Verdeckung von Fassaden und Fassadenteilen durch Vegetation sowie die geringere Auflösung der Aufnahmen aus größerer Höhe als aus niedriger Höhe mit der Drohne. Einige Elemente wie Dachterrassen und -fenster werden durch den Rekonstruktionsalgorithmus bisher nicht erfasst. Parallel dazu wurde gezeigt, dass ein solches Modell im noch weiter eingeschränkten Detailgrad LoD1 (nur Grundriss und Höhe der Gebäude) auch aus optischen Satellitendaten erzeugt werden kann.



Abb. 4.7-2: 3D-Modell für ein Stadtquartier [DLR]

Quantitative Infrarotthermographie

Infrarotthermographie ist ein weit verbreitetes Verfahren, um qualitativ Wärmebrücken zu finden und den Bedarf von Sanierungsmaßnahmen an der Gebäudehülle anschaulich zu machen. Quantitative Infrarotthermographie zur Bestimmung von U-Werten wird nach aktuellem Stand der Technik meist von innen durchgeführt. Dabei wird in den meisten Fällen ein Mittelungsverfahren verwendet, in dem über mehrere Tage Daten mit einer Infrarotkamera und Lufttemperatursensoren aufgenommen und gemittelt werden. Der U-Wert wird dann errechnet unter der Annahme, dass ein stationärer Zustand für die Wärmeflüsse und Temperaturen angesetzt werden kann. In der Literatur werden Abweichungen von etwa 20 % zwischen diesem Verfahren und Referenzverfahren beschrieben. Ein Ziel von Gtom ist es, ein Verfahren zu finden, das Messungen von außen ermöglicht und in kürzerer Zeit durchgeführt werden kann – bei mindestens ebenso hoher Genauigkeit. Hierzu wurde zunächst eine systematische Unsicherheitsanalyse des Verfahrens nach dem Stand der Technik durchgeführt. Während beispielsweise die Innenraumtemperatur bei einer Messung von außen vergleichsweise geringe Einflüsse hat, ist die Messung der Wandtemperatur und der Umgebungstrahlung mit der Infrarotkamera von außen der dominierende Einfluss, sofern tatsächlich von einem stationären Zustand ausgegangen werden kann [4]. Als Alternative dazu wird in Gtom ein Verfahren entwickelt, das ohne die Annahme eines stationären Zustands auskommt. Dies verspricht eine deutlich kürzere Messdauer als beim gängigen Mittelungsverfahren.

Dichtheitsprüfung mittels akustischer Messverfahren

Die Analyse der Luftdichtheit einer Gebäudehülle spielt eine wichtige Rolle bei der energetischen Bewertung von Gebäuden. Undichte Stellen der Gebäudehülle tragen zu einem höheren Energieverbrauch bei und können zudem Schäden in den Wandzwischenräumen durch Kondensation von Wasser verursachen oder die Leistung bestehender Belüftungssysteme im Gebäude erheblich beeinträchtigen.

Das am weitesten verbreitete Verfahren zur Bestimmung der Luftdichtheit ist das sogenannte Differenzdruck-Messverfahren, auch Blower-Door-Test genannt. Dieses Verfahren ist in seiner Durchführung allerdings aufwendig und zeitintensiv. Zudem ist das Auffinden einzelner Lecks in der Gebäudehülle mit diesem Messverfahren schwierig und die Quantifizierung des Einflusses einzelner Lecks auf die Luftaustauschrate des gesamten Gebäudes ist nahezu unmöglich.

Im Rahmen dieses Projektes wird an der Entwicklung eines Messverfahrens gearbeitet, um einzelne Leckagen in der Gebäudehülle besser quantifizieren zu können. Die Verwendung von akustischen Messmethoden scheint dahingehend ein vielversprechender Ansatz zu sein. Der verwendete Frequenzbereich konzentriert sich in diesem Projekt besonders auf den Ultraschallbereich (bis ca. 100 kHz). Der Einsatz von Ultraschall bietet den Vorteil, dass das Messsystem außerhalb des menschlichen Hörvermögens arbeitet und somit das Leben und die Arbeit innerhalb eines Gebäudes nur geringfügig beeinträchtigt. Zudem liegt die Länge der

Schallwellen bei diesen Frequenzen in den gleichen Größenordnungen wie die Abmessungen möglicher Leckagen in der Gebäudehülle. Bis 100 kHz ist auch die Dämpfung der Schallwellen innerhalb der Medien noch vertretbar gering.

Um verschiedene Leckage-Arten und -Größen untersuchen zu können, wurde eine Testkammer entwickelt, die aus zwei Räumen besteht. Beide Räume sind durch eine Wand getrennt, in der realistische Lecks nachgebildet werden können. Es wurden unterschiedliche Wanddicken, Materialien und Isolationen, sowie variierende Leck-Größen, -Längen und Formen angefertigt und getestet. Mit diesem Aufbau konnten für die verschiedenen nachgebildeten Lecks jeweils die frequenz aufgelöste Schalltransmission mit Hilfe von Impulsantworten ermittelt werden. Weiterhin konnten Differenzdruck-Messungen im gleichen Testaufbau durchgeführt werden, um das herkömmliche Verfahren mit dem akustischen Verfahren unter gleichen Randbedingungen vergleichen zu können. Ziel dieser Untersuchungen ist es, zu prüfen, inwieweit aus den frequenz aufgelösten Impulsantworten Rückschlüsse auf die Lecks gezogen werden können und diese mit Luftaustauschraten korreliert werden können. Erste Ergebnisse wurden in [5] und [6] veröffentlicht.

Radar

Beim Radarverfahren wird Mikrowellenstrahlung in einem breiten Frequenzband in eine Wand eingestrahlt und die Reflexion gemessen. Die Strahlung dringt in die Wand ein und wird an jeder Grenzschicht partiell reflektiert. Die Dämpfung des Signals und die Ausbreitungsgeschwindigkeit in den Wand-

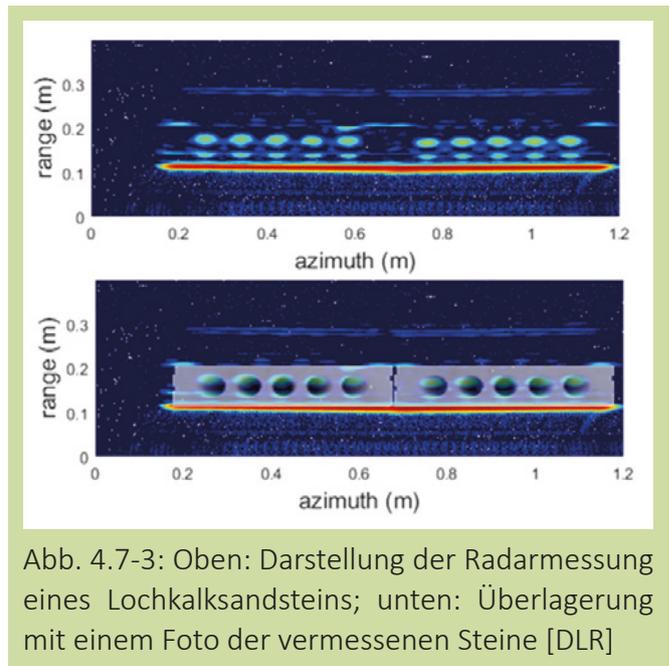


Abb. 4.7-3: Oben: Darstellung der Radarmessung eines Lochkalksandsteins; unten: Überlagerung mit einem Foto der vermessenen Steine [DLR]

schichten hängen von der elektromagnetischen Permittivität der jeweiligen Schicht ab. Maxima im Reflexionsprofil, die zu unterschiedlichen Zeiten beobachtet werden, deuten daher auf Schichtgrenzen hin. Nebeneinanderliegende Profile, die durch ein Abfahren der Wand mit dem Radar erzeugt werden, können über spezielle Verfahren – die Radarprozessierung – auch in zwei- oder sogar dreidimensionale Bilder der Reflexionsverteilung umgeformt werden. In einer Vielzahl von Laborexperimenten wurden unterschiedliche Wandaufbauten untersucht und verschiedene Prozessierungsverfahren erprobt. So wurde u. a. gezeigt, dass für unterschiedliche Varianten die Schichtzahlen, die Permittivitäten und sogar die inneren Strukturen der Wände sowie z. B. Steinarten ermittelt werden können [7]. Abb. 4.7-3 zeigt dies beispielhaft für einen Lochkalksandstein.

Die Ergebnisse einer Messkampagne an Versuchswänden unter realen Wetterbedingungen sowie an demselben Versuchsgebäude, an dem auch die geometrische Rekonstruktion erprobt wurde, befinden sich zum Zeitpunkt der Verfassung dieses Artikels noch in der Auswertung. Im Rahmen von Gtom sind gleichzeitig Verfahren entwickelt worden, um aus solchen Messungen die Permittivitäten der verschiedenen Schichten zu bestimmen. In einer Messkampagne an knapp 60 Proben aus dem Mauerwerk abgerissener Gebäude wurde parallel untersucht, ob eine Korrelation zwischen der Permittivität und thermischen Eigenschaften, wie der Wärmeleitfähigkeit der Steine, hergestellt werden kann. Es zeigt sich, dass für einen großen Teil der Proben ein nahezu linearer Zusammenhang vorliegt. Allein Kalksandsteine scheinen diesen Zusammenhang nicht zu erfüllen.

4.7.3 Ergebnisse / Schlussfolgerung

Im Projekt Gtom hat sich das große Potenzial verschiedener Fernerkundungsmethoden für die energetische Charakterisierung von Gebäudehüllen und insbesondere deren kombinierte Verwertung bestätigt. Es wurden in mehreren Messkampagnen die verschiedenen Messverfahren getestet, ihre Ergebnisse ausgewertet und zusammengeführt. Das so entstandene Gebäudemodell enthält – auf der Ebene des Einzelgebäudes – bereits sämtliche Geometrieinformationen mit einer Genauigkeit, die eine energetische Simulation des Gebäudes ermöglicht. Die Bestimmung bauphysikalischer Größen befindet sich noch auf einem früheren Entwicklungslevel.

Sowohl die quantitative Infrarotthermographie als auch Radarmessungen liefern allerdings sehr vielversprechende Ergebnisse. Das Projekt hat sein Ziel, vielversprechende Methoden für einen Werkzeugkasten für die schnelle, genaue und berührungslose energetische Vermessung von Gebäuden zu identifizieren, daher bereits erreicht.

Wir bedanken uns beim Bundesministerium für Wirtschaft und Energie für die Förderung (FKZ 03ET1405A/B), bei der Senatsverwaltung Berlin für die Unterstützung bei der Auswahl des Testquartiers in Berlin und bei RWE für die Bereitstellung des Versuchsgebäudes.

Literatur:

- [1] Frommholz, D., Linkiewicz, M., Meißner, H., Dahlke, D., Reconstructing Buildings with Discontinuities and Roof Overhangs from Oblique Aerial Imagery, International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives, XLII-1 (W1) (2017), 465-471.
- [2] Meixner, P., Leberl, F., From Aerial Images to a Description of Real Properties: A Framework, Proceedings of the International Conference on Computer Vision Theory and Applications (2010), 283-291.
- [3] Gorzalka, P., Estevam Schmiedt, J., Frommholz, D., Linkiewicz, M., Patel, D., Plattner, S., Schorn, C., Göttsche, J., Hoffschmidt, B., Remote Sensing For Building Energy Simulation Input – A Field Trial, Proceedings of Building Simulation 2019 (2019), (im Druck).
- [4] Patel, D., Estevam Schmiedt, J., Röger, M., Hoffschmidt, B., Approach for external measurements of the heat transfer coefficient (U-value) of building envelope components using UAV based infrared thermography, 14th Quantitative Infrared Thermography Conference QUIRT (2018).
- [5] Kölsch, B., Tiddens, A., Estevam Schmiedt, J., Schiricke, B., Hoffschmidt, B., Detection of Air Leakage in Building Envelopes using Ultrasound Technology, Whole Building Air Leakage: Testing and Building Performance Impacts (2019), 160-183, doi: 10.1520/STP161520180022
- [6] Kölsch, B., Schiricke, B., Estevam Schmiedt, J., Hoffschmidt, B., Estimation of Air Leakage Sizes in Building Envelope using High-Frequency Acoustic Impulse Response Technique, Proc. 40th AIVC Conference, Gent (2019), 80-89.

- [7] Haas, A., Peichl, M., Dill, S., Characterization of Wall Structures with Microwaves, Proceedings of SPIE. SPIE Defense & Commercial Sensing (2018).

Kontakt:

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR)

Dr. Jacob Estevam Schmiedt
Institut für Solarforschung
Jacob.EstevamSchmiedt@dlr.de

Dr. Markus Peichl
Institut für Hochfrequenztechnik und Radarsysteme
Markus.Peichl@dlr.de

Dipl.-Geogr. Stefan Plattner
Institut für Methodik der Fernerkundung
Stefan.Plattner@dlr.de

Dr. Sebastian Pless
Institut für Optische Sensorsysteme
Sebastian.Pless@dlr.de

Solar-Institut Jülich (SIJ)
Effiziente Gebäude- und Anlagentechnik

Dr. Joachim Göttsche
Goettsche@sj.fh-aachen.de

4.8 Betriebsoptimierung: Nemo-Wärme netze im energetischen Monitoring

Fernwärmesystemen kommt eine Schlüsselrolle beim Übergang zu einer nachhaltigen Energieversorgung auf Basis erneuerbarer Energieträger zu, wie Leitstudien verschiedener Verbände und Institute belegen, vgl. [1] bis [4]. Durch die Möglichkeit, sowohl zentrale als auch dezentrale Wärmequellen einzubinden und die Wärme effizient an eine Vielzahl von Verbrauchern zu liefern, lassen sich Wärmequellen erschließen, die in dezentralen Einzelanlagen nicht wirtschaftlich nutzbar sind. Gleichzeitig bieten Fernwärmesysteme erhebliche Kapazitäten für die Speicherung von Energie und können durch Kopplung verschiedener Energiesektoren dazu beitragen, Fluktuationen in Erzeugung und Verbrauch von Endenergie auszugleichen.

Der effiziente Betrieb von Fernwärmesystemen basiert dabei auf einem komplexen Zusammenspiel vieler Teilsysteme, die zum Teil autonom geregelt werden. Als wichtige Beispiele sind hier zentrale und dezentrale Wärmeeinspeiser zu nennen, aber auch das Verteilnetz mit übergeordneter Hydraulik und Temperaturmanagement sowie die zahlreichen großen und kleinen Wärmeübergabestationen mit jeweils eigener Regelung und individuellen, nachgeordneten Wärmeverbrauchern. Um die Funktion des Gesamtsystems und seine Energieeffizienz im Betrieb sicherstellen zu können, bedarf es eines kontinuierlichen technischen Monitorings, das die komplexen Zusammenhänge durch Kennzahlen abbildet und dem Betreiber Optimierungspotenziale und Einflussmöglichkeiten aufzeigt.

Im Gebäudebereich existieren bereits Normen, Richtlinien und Leitfäden, die Standards für die Energieeffizienz von Gebäuden definieren und sich dabei auch mit der Rolle der Gebäudeautomation auseinandersetzen, beispielsweise die DIN-Normen DIN V 18599 [5] und DIN EN 15232 [6]. Mit der technischen Richtlinie VDI 6041 [7] und der Empfehlung AMEV 135 [8] sind weitere Hilfestellungen für die Entwicklung und Umsetzung von Monitoringkonzepten im Gebäudebereich verfügbar. Ein vergleichbares Instrumentarium gibt es im Bereich der Fernwärme nicht. Zwar setzen die Arbeitsblätter FW 309 Teil 1-6 des AGFW [9] Standards für die Ermittlung von Kennzahlen für die Energieeffizienz von Fernwärmesystemen, die Methoden beschränken sich aber auf die Bestimmung von Jahreswerten und verfolgen nicht das Ziel eines kontinuierlichen Monitorings zur Identifizierung von betrieblichen Optimierungspotenzialen.

4.8.1 Merkmale der Methode

Ziel des Forschungsvorhabens „Nemo“ ist daher die Entwicklung einer Methode, die es Betreibern ermöglicht, die Energieflüsse im Fernwärmesystem kostengünstig kontinuierlich zu überwachen, relevante Kennzahlen zu bilden, Optimierungspotenziale zu identifizieren und entsprechende Maßnahmen zur Hebung der Potenziale abzuleiten. Diese Methode umfasst:

1. Anforderungen an ein effektives und kosteneffizientes Monitoring von Fernwärmesystemen,
2. Empfehlungen und Anleitungen zur Ermittlung, Erfassung und Aufbereitung von Messdaten aus

Fernwärmesystemen,

3. Einen Katalog von relevanten Kennzahlen, die aus den Messdaten gebildet werden,
4. Eine Beschreibung von Vorgehensweisen für die Analyse der Kennzahlen und die Identifizierung von Optimierungspotenzialen.

Das konkrete Vorgehen beim Monitoring von Fernwärmesystemen besteht im Wesentlichen in der Ermittlung und Analyse von Kennzahlen, die alle energierelevanten Bereiche des Betriebs von Fernwärmenetzen abdecken. Die Grundlage für das Monitoring bildet daher ein strukturiertes, konsistentes

Kennzahlensystem, in dem die Kennzahlen definiert und miteinander in Beziehung gesetzt werden. Teil der Kennzahlendefinition ist dabei auch die Festlegung von Bilanzräumen und System- bzw. Teilsystemgrenzen. Abb. 4.8-1 zeigt sechs Systemgrenzen A bis F, in die ein Fernwärmesystem aufgeteilt werden kann, da sie grundsätzlich in jedem Fernwärmesystem enthalten sind. Exemplarisch sind Teilsysteme a bis e eingezeichnet, welche sich je nach Fernwärmesystem unterscheiden können. Zusätzlich werden die Energieflüsse 1 bis 8 dargestellt, um mögliche Wechselwirkungen aufzuzeigen.

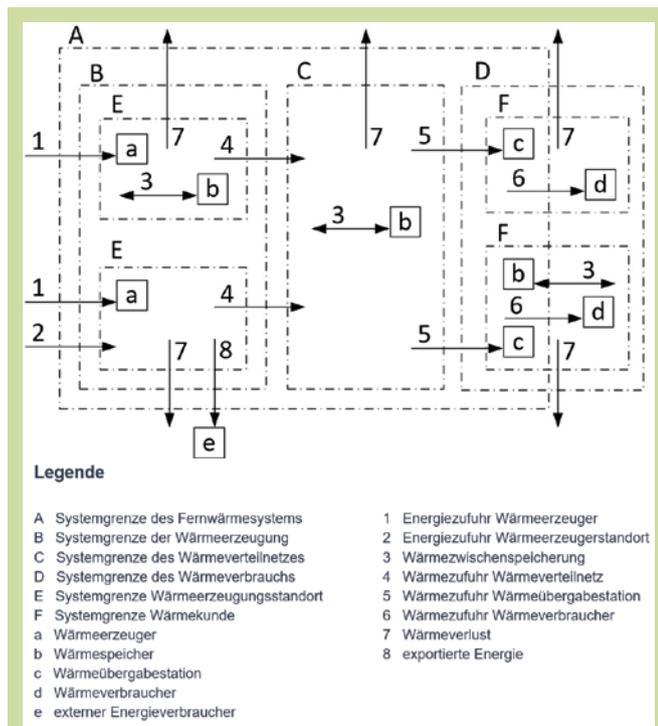


Abb. 4.8-1: Systemgrenzen, Teilsystemgrenzen und Energieflüsse in einem Fernwärmesystem

4.8.2 Arbeitsschritte im Projekt

Um die Methode zu entwickeln, wird ein technisches Monitoring für 15 reale Fernwärmesysteme parallel aufgebaut und über einen Zeitraum von jeweils 24 Monaten betrieben. Die Fernwärmesysteme liegen mehrheitlich in der südlichen Hälfte von Deutschland. Sie weisen sehr unterschiedliche Erzeuger- und Abnehmerstrukturen auf und es handelt sich um kleinere bis mittlere Fernwärmesysteme mit bis zu 1.250 angeschlossenen Wärmeverbraucher.

Entwicklung eines Kennzahlenkatalogs

Um ein Fernwärmesystem ganzheitlich betrachten zu können, bedarf es einer klaren Definition aller relevanten Teilsysteme. Jedes Fernwärmesystem lässt sich im Wesentlichen in die Hauptsysteme Wärmeerzeugung, Wärmeverteilung und Wärmeabnahme unterteilen. In jedem dieser Hauptsysteme befindet sich eine Vielzahl von Komponenten, die messtechnisch erfasst werden können. Daraus

lassen sich verschiedene nützliche Kennzahlentypen bilden. Der Kennzahlenkatalog dient der Strukturierung und klaren Definition der verschiedenen Kennzahlen. Die Gliederung des Katalogs beruht auf den in Abb. 4.8-1 dargestellten Systemgrenzen. Einige Kennzahlen geben Auskunft über das gesamte Fernwärmesystem, wie der Primärenergiefaktor [9]. Es gibt Kennzahlen, wie die gesamt erzeugte Wärmemenge, welche Informationen über eines der Hauptsysteme liefern. Aber auch viele Kennzahlen, welche die Objekte innerhalb dieser Systeme betrachten, wie der Wärmespeicheraktivitätsindex [10] oder der Mittlere Ausfallabstand zwischen Störungen eines Erzeugers (MTBF) [11].

Der Kennzahlenkatalog erfasst aktuell 140 Kennzahlen. Die meisten davon sind in der Branche bereits bekannt und gebräuchlich. Ein Großteil der Kennzahlen beschreibt direkt erfasste Größen wie Temperaturen, Leistungen, Drücke oder Energien. Solche Kennzahlen werden bereits bei vielen Betreibern überwacht und analysiert. Andere im Katalog enthaltene Kennzahlen wie das Volumenabsenkungspotenzial (vgl. Abschnitt Analyse der Messdaten und Kennzahlen...) versuchen durch das Zusammenführen von mehreren Kennzahlen einen Sachverhalt komprimiert darzustellen.

In den Katalog sollen zukünftig weitere Kennzahlen mit aufgenommen werden. Der Fokus liegt dabei einerseits auf Kennzahlen, die technische Optimierungspotenziale möglichst kompakt darstellen, wie beispielsweise Auswirkungen durch verschmutzte Wärmeübertragungsflächen bei den Verbrauchern oder ungünstiges Regelverhalten bei Festbrennstoffkesseln, und andererseits auf Kennzahlen, die

bei der längerfristigen Bewertung und Weiterentwicklung der Anlagen im Sinne eines Asset Managements unterstützen.

Bestandsaufnahme der Netze und Entwicklung eines Messkonzepts

Für den Erfolg des Monitoringkonzepts ist es entscheidend, dass das Verfahren nicht auf neu geplante Fernwärmesysteme beschränkt ist, sondern sich insbesondere auch bei bestehenden Anlagen anwenden lässt. Gleichzeitig ist Kosteneffizienz ein wesentliches Ziel, da Monitoring nur dann wirtschaftlich sinnvoll ist, wenn die erzielbaren Einsparungen die Kosten des Monitorings übertreffen. Aus diesen Gründen soll beim Monitoring soweit wie möglich auf vorhandene Messstellen zurückgegriffen werden.

Hierzu werden zunächst die Wärmeschaltbilder der Netze erfasst. Anschließend werden alle für das Vorhaben relevanten Daten der Netze über Datenerhebungsbögen bei den Betreibern abgefragt. Fehlende Daten werden in vor-Ort-Terminen erhoben, wobei auch die komplette relevante Netztechnik sowie die vorhandene Technik zur Aufnahme und Weiterverarbeitung von Messdaten erfasst werden. Anschließend wird die vorhandene Messtechnik mit den technischen Anforderungen, die zur Ermittlung der Kennzahlen zu stellen sind, abgeglichen und eine Liste der nachzurüstenden Technik erstellt.

Datenzentralisierung und Monitoring

Die Datenzentralisierung ist eine der Hauptaufgaben innerhalb des Forschungsvorhabens. Mehrere Millionen Messwerte pro Tag aus 15 Fernwärmesys-

temen werden in eine Datenbank gespeichert, um dort für die Analyse und zur Visualisierung verfügbar gemacht zu werden. Für die Umsetzung der Datenzentralisierung wurde ein Big-Data-Webdienst entwickelt, der es ermöglicht, über eine einheitliche Datenschnittstelle hochfrequent Daten fortlaufend zu validieren und zu speichern. Die große Datenmenge entsteht durch die hohe zeitliche Auflösung der Messstellen, die notwendig ist, um die dynamischen Vorgänge in Fernwärmesystemen erfassen zu können. Die Messdaten aus den Fernwärmesystemen werden, wie in Abb. 4.8-2 dargestellt, aus verschiedenen Datenquellen gewonnen und über unterschiedliche Übertragungswege an die zentrale Datenbankanwendung geschickt. Eine besondere Herausforderung des Projektes liegt darin, den Zugriff auf Messdaten und die Freigabe notwendiger Datenschnittstellen so umzusetzen, dass die IT-Sicherheitsrichtlinien der Versorgungsunternehmen eingehalten werden.

Die Hausstationen, die für das Monitoring zur Verfügung stehen, haben die Digitalisierungsstufen 0 bis 1 von 6 gemäß der im Forschungsvorhaben iHAST entwickelten Systematik [12]. In der Digitalisierungsstufe 1 ist die digitale Fernauslesung des Wärmezählers der Hausübergabestation mindestens im Viertelstundentakt möglich. Insgesamt stehen Messdaten von ca. 1.300 Wärmekunden der Digitalisierungsstufe 1 zur Verfügung, die anonymisiert an den Big-Data-Webdienst übertragen und gespeichert werden. Die Datenübertragung geschieht ausschließlich automatisiert und über verschiedene verschlüsselte Übertragungswege aus der IT-Infrastruktur des Wärmeversorgers heraus. Die Daten werden anschließend validiert und in der Zeitreihendatenbank auf Basis von InfluxDB® gespeichert. Die Messdatenvalidierung geschieht derzeit anhand von Grenzwerten und individuell anpassbarer linearer Funktionen.

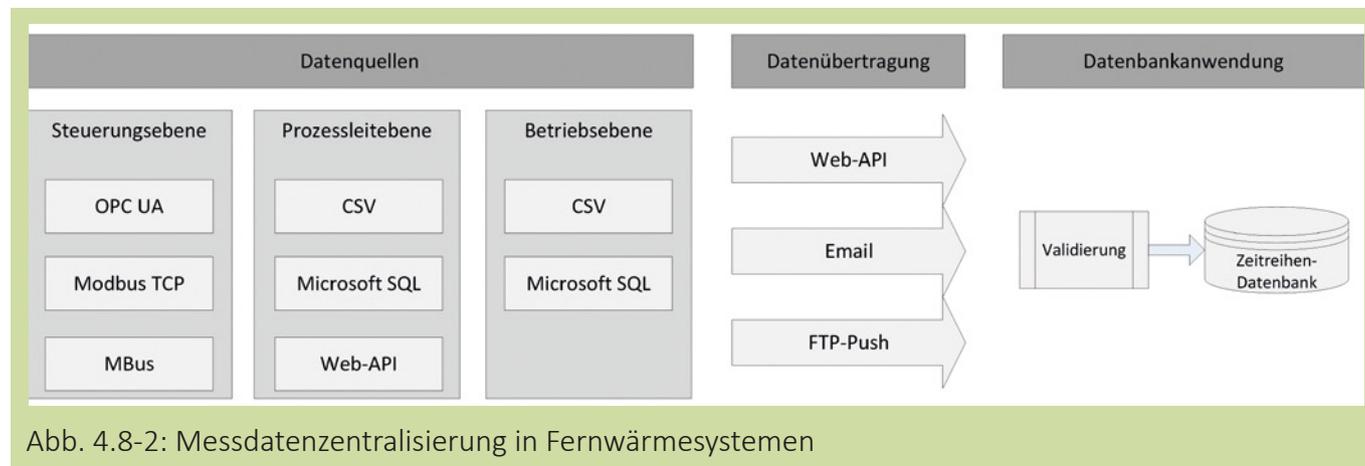


Abb. 4.8-2: Messdatenzentralisierung in Fernwärmesystemen

Entwicklung von Software zur Aufbereitung und Visualisierung von Messdaten und Kennzahlen

Im Rahmen des Projektes entsteht das Monitoring-tool MetricX. MetricX bietet einen Big-Data-Webdienst und ein Webtool zur Datenvisualisierung, -analyse und -management. Das Tool ermöglicht die Verarbeitung von mehreren Millionen Messwerten pro Tag. Es bietet des Weiteren Möglichkeiten zur Datenbereinigung, Aggregation und Anwendung von Rechenoperationen auf Zeitreihen. Mit einer integrierten Notizbuchfunktion („MetricX-Notobook“) wird die Messdatenvisualisierung mit einem Texteditor vereint. So können Analysen und Reporte erstellt, gespeichert und mit anderen Anwendern geteilt werden. Spezifische Auswertungen können in Dashboards durchgeführt werden. MetricX soll künftig nicht nur innerhalb des Projektes Nemo Anwendung finden, sondern auch in anderen Forschungsprojekten. Die Weiterentwicklung hin zu einer auch kommerziell einsetzbaren Software ist angedacht.

Analyse der Messdaten und Kennzahlen, Identifizieren von Optimierungspotenzialen und Katalogisieren von Analysemethoden

Die erfassten und aufbereiteten Messdaten und Kennzahlen werden analysiert, um Optimierungspotenziale der Fernwärmesysteme im Betrieb zu identifizieren. Dabei ist das vorrangige Ziel die Entwicklung und Erprobung standardisierter Vorgehensweisen und Analysetechniken, die zwischen den betrachteten Fernwärmesystemen übertragbar sind und die es ermöglichen, typische Optimierungspotenziale in allen Netzen sicher zu erkennen. Geeignete Analy-

semethoden werden gemeinsam mit den jeweiligen messtechnischen Voraussetzungen in einem Katalog zusammengestellt. Neu ist das in sich konsistente System aus Kennzahlen, benötigten Messgrößen und Analyseverfahren, das es dem Fernwärmeversorger ermöglicht zu bewerten, welche Erkenntnisse er durch bereits vorhandene Datenerfassung/Messtechnik zusätzlich gewinnen kann bzw. wie groß der zusätzliche messtechnische Aufwand ist, der notwendig ist, um weitere Kennzahlen zu ermitteln.

Entwicklung eines Leitfadens

Ein Hauptergebnis des Vorhabens ist ein Leitfaden, welcher die entwickelte Methode vollständig und umsetzungsorientiert beschreibt. Er bildet die Basis für die anschließende Verbreitung und Verwertung. Wesentliche Bestandteile sind die Empfehlungen zur Datenerfassung, der Kennzahlenkatalog, eine Beschreibung von Analysemethoden sowie ein beispielhafter Katalog von typischen Optimierungspotenzialen. Im Nachgang zum Projekt sollen Netzbetreiber geschult werden, um das entwickelte Verfahren anwenden zu können. Das entsprechende Konzept dazu wird noch im Rahmen des Vorhabens entwickelt. Eine Aufnahme des Verfahrens in das technische Regelwerk des AGFW wird geprüft.

4.8.3 Ergebnisse / Schlussfolgerungen

Ziel des gesamten Vorhabens ist die Entwicklung eines standardisierten Vorgehens zum kostengünstigen Monitoring von Fernwärmesystemen und zur Ableitung von Optimierungspotenzialen sowie von Maßnahmen zur Hebung dieser Potenziale.

Mit fortschreitender Digitalisierung im Fernwärme-sektor und der damit einhergehenden zunehmenden Erfassung von Messdaten stellt sich die Frage, wie diese Daten sinnvoll genutzt werden können, um den Betrieb der Systeme zu optimieren. Gleichzeitig erfüllen damit immer mehr Fernwärmesysteme die messtechnischen Anforderungen, die an ein umfassendes technisches Monitoring zu stellen sind.

Der hier entwickelte Leitfaden kann eine wichtige Hilfestellung sein, um die Energieflüsse im System zu überwachen und den Betrieb zu optimieren. Über die kurzfristige Optimierung hinaus kann damit auch eine Datengrundlage für ein langfristig orientiertes Asset Management geschaffen werden. Die konkrete Umsetzung in der Praxis kann in aller Regel IT-basiert, je nach Zielstellung beispielsweise über eine Erweiterung der Prozessleittechnik oder des Energiedatenmanagementsystems erfolgen.

Ein wesentlicher Vorteil eines kennzahlenbasierten Vorgehens wie es im Nemo-Vorhaben entwickelt wird, liegt in der Skalierbarkeit. Einmal in das Monitoringsystem eingepflegt, können mit diesem Verfahren viele Fernwärmesysteme parallel detailliert analysiert und Optimierungspotenziale auch quantitativ ermittelt werden. Je nach messtechnischen Gegebenheiten können die relevanten Kennzahlen auch sehr zeitnah gebildet und somit eine detaillierte Liveüberwachung aufgebaut werden.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens werden mit der Entwicklung von MetricX die Grundlagen einer webbasierten Anwendung erarbeitet, mit deren Hilfe die Funktionalitäten des Monitorings orts- und systemunabhängig umgesetzt werden können. Die

entwickelten Methoden lassen sich grundsätzlich auch auf große Fernwärmesysteme erweitern.

Das Vorhaben wird im Rahmen des 6. Energieforschungsprogramms der Bundesregierung vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie unter dem Förderkennzeichen 03ET1538 gefördert. Wir bedanken uns bei den Mitarbeitern des Projektträgers Jülich für die hervorragende Betreuung des Vorhabens. Ganz herzlicher Dank gilt allen teilnehmenden Fernwärmeversorgern für die sehr gute Zusammenarbeit und die tatkräftige Unterstützung unserer Arbeit.

Literatur:

- [1] Blesl, M., Koziol, M., Ludwig, C., Rapp, H., Tenberg, B., Vautz, S., Wolf, S., 40/40 Strategie - Unser Konzept für die Wärmewende, Bericht der AGFW | Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e.V., 2018.
- [2] Gerbert, P., Herold, P., Burchardt, J., Schönberger, J., Rechenmacher, F., Kirchner, A., Klimapfade für Deutschland, Bericht des Bundesverbands der Deutschen Industrie e. V., 2018.
- [3] Bründlinger, T., König, J., Frank, O., Gründig, D., Jugel, C., Kraft, P., Leitstudie Integrierte Energiewende - Impulse für die Gestaltung des Energiesystems bis 2050, Ergebnisbericht und Handlungsempfehlungen der Deutschen Energie-Agentur GmbH (dena), 2018.

- [4] Gerhardt, N., Jentsch, M., Rodriguez, J., Stroh, K., Buchmann, E., Entwicklung der Gebäudewärme und Rückkopplung mit dem Energiesystem in -95 % THG-Klimazielszenarien, Bericht des Fraunhofer-Instituts für Energiewirtschaft und Energiesystemtechnik, 2019.
- [5] DIN V 18599:2018-09, Energetische Bewertung von Gebäuden - Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung, Beuth-Verlag, 2018.
- [6] DIN EN 15232:2017-12, Energieeffizienz von Gebäuden, Beuth-Verlag, 2017.
- [7] VDI 6041:2017-07, Facility-Management - Technisches Monitoring von Gebäuden und gebäudetechnischen Anlagen
- [8] AMEV 135:2017-08, Technisches Monitoring 2017 - Technisches Monitoring als Instrument zur Qualitätssicherung
- [9] AGFW, Regelwerk Fernwärme, Frankfurt am Main: AGFW | Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e.V., 2018.
- [10] S. Schuster und D. Bücken, „Key Performance Indicators for Thermal Energy Storage in District Heating Systems,“ EuroHeat&Power International, Nr. III, pp. 15-18, 2018
- [11] DIN EN 8743:2014-01, Verpackungsmaschinen und Verpackungsanlagen - Kennzahlen zur Charakterisierung des Betriebsverhaltens und Bedingungen für deren Ermittlung im Rahmen eines Abnahmelaufs, Beuth-Verlag, 2014.
- [12] Volmer, V., iHAST – Digitalisierung im Quartier mit intelligenten Fernwärmehausstationen; (Vortrag, 24.09.2019), Dresden: Dresdner Fernwärmekolloquium 2019

Kontakt:

Technische Hochschule Rosenheim
Institut für nachhaltige Energieversorgung

Prof. Dr.-Ing. Dominikus Bücken
dominikus.buecker@th-rosenheim.de

Marc Hager, M.Sc.
marc.hager@th-rosenheim.de

Rupert Wieser, M.Sc.
rupert.wieser@th-rosenheim.de

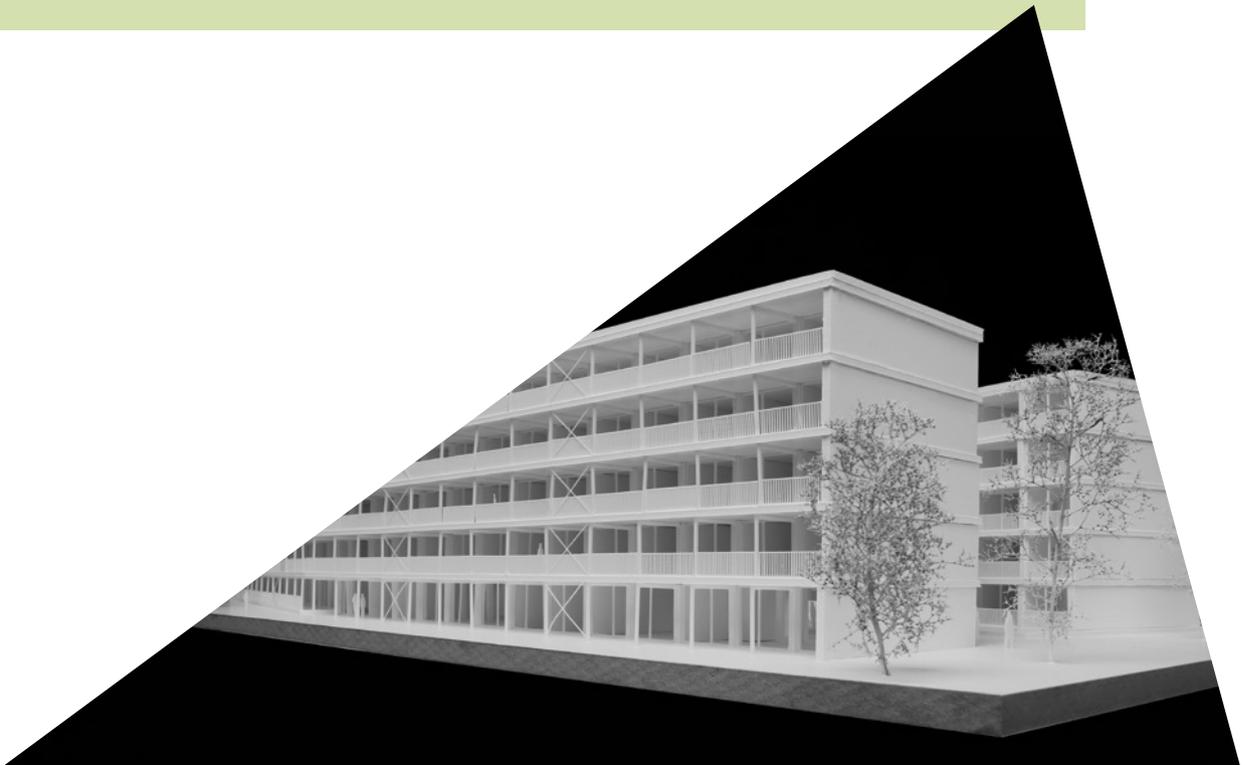
AGFW | Der Energieeffizienzverband für Wärme,
Kälte und KWK e. V.

Sebastian Grimm, M.Sc.
s.grimm@agfw.de



05

GEBÄUDE



GEBÄUDE

5.1 Der Gebäudesektor

5.2 Differenzierung Wohn- und Nichtwohngebäude

5.3 Energetische Bestandssanierung

5.4 Energetische Betriebsoptimierung bei Bestandsgebäuden

5.5 Energetische Sanierung mit zusätzlicher Betriebsoptimierung

5.6 Plusenergieschule Detmold

5.7 degewo ZKH: Klimagerechte Sanierung eines MFH | Betriebsergebnisse

5.8 Forschungsprojekt „Big Data für EnBop“



Dieses Kapitel thematisiert Bestandsgebäude und ihre Potentiale zur Energieeinsparung durch Sanierung und Betriebsoptimierung. Es wird auf unterschiedliche Gebäudetypen und verschiedene Maßnahmen zur Energieeinsparung eingegangen. Zudem werden drei Projektbeispiele und ihre Erfahrungen vorgestellt.



5.1 Der Gebäudesektor

Aktuelle Studien belegen, dass Deutschland bzgl. der Pro-Kopf-Emissionen im Gebäudebereich an dritter Stelle aller G20-Länder steht [1]. Dies ist unter anderem auf die hohe Anzahl der Gebäude zurückzuführen, die vor der ersten Wärmeschutzverordnung im Jahr 1978 und somit mit geringen energetischen Anforderungen erstellt wurden [2]. Ein weiterer Grund ist die seit Jahren stagnierende Sanierungsquote der Bestandsgebäude bei unter 1 % pro Jahr [3] und es ist keine Beschleunigung bei der Energieeffizienz im Wärmesektor erkennbar [4]. Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz beziehen sich zum einen auf die bauphysikalische oder anlagentechnische Sanierung, z. B. durch die Einbringung cross-sektoraler Technologien, die als ein entscheidendes Element der Energiewende den positiven Trend des Stromsektors auf den wichtigen Wärmesektor übertragen sollen [5]. Zum anderen kann durch minimalinvasive Maßnahmen, wie der Betriebsoptimierung, eine Effizienzsteigerung erzielt werden.

In diesem Kapitel werden daher die Gebäudeprojekte der Forschungsinitiative Energie in Gebäuden und Quartieren, die genau diese Themen in ihrer Forschungsarbeit untersuchen, genauer betrachtet. Dabei werden in den folgenden Abschnitten einige Auswertungen der dritten Umfragephase des Online-Fragebogens der Wissenschaftlichen Begleitforschung vorgestellt, in das Thema Bestandsanierung und Optimierung eingeleitet und Fragestellungen zur Diskussion gestellt.

Im Anschluss an die einleitende Auswertung der

Gebäudeprojekte greifen drei Forschungsprojekte die zur Diskussion gestellten Fragen auf und präsentieren ihre Ergebnisse aus dem Bereich der Bestandsanalyse, Gebäudesanierung und Optimierung. Dabei berichten sie z. B. von Erfahrungen aus der Einbringung innovativer, technischer Systeme in Bestandsgebäude. Erfolge, aber auch Hemmnisse, können in diesem Zusammenhang eine wertvolle Stütze für Projekte auch außerhalb der Forschung sein und sind daher ein wichtiger Aspekt im Kontext der Übertragbarkeit von Projektergebnissen aus der Forschung in die Praxis.

5.1.1 Gebäudeprojekte in der Wissenschaftlichen Begleitforschung

Von den Forschungsprojekten, die im Zuge der Forschungsinitiative Energie in Gebäuden und Quartieren im Jahr 2019 gefördert wurden und sich an der dritten Fragebogenphase beteiligten, sind etwa 14 % dem Gebäudebereich zuzuordnen. Damit stehen Forschungsfragestellungen aus diesem Bereich an wichtiger Stelle im Kontext des Forschungsbereichs Energie in Gebäuden und Quartieren des BMWi. Die Untersuchungsschwerpunkte der Forschungsprojekte decken dabei sowohl thematisch als auch methodisch ein breites Spektrum ab. Abbildung 5.1-1 zeigt die Aufteilung auf die verschiedenen Projekttypen Monitoring- und Umsetzungsprojekt, Simulations- und Konzeptstudie, die mithilfe der dritten Umfragephase des Online-Fragebogens der Begleitforschung ermittelt wurde. Hierbei fällt auf, dass viele Projekte das Thema Monitoring in ihre Projektdurchführung integrieren und die Ana-

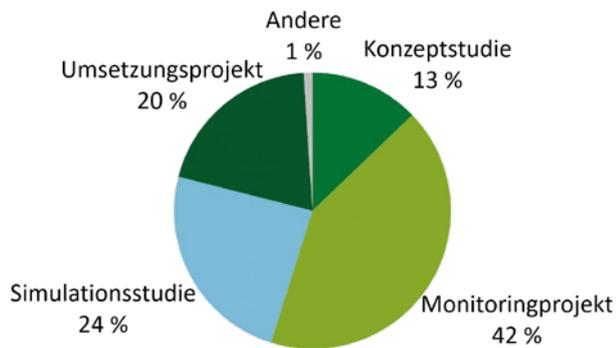


Abb. 5.1-1: Online-Fragebogen der BF: Welchem Projekttyp ordnen Sie die Untersuchungen zu? (Antworten zu 118 Gebäuden, Mehrfachauswahl möglich)

lyse von Gebäudekennwerten bzw. die Evaluierung der im Rahmen eines Forschungsprojekts umgesetzten Maßnahmen folglich einen hohen Stellenwert hat, womit die hohen wissenschaftlichen Ansprüche der Projekte aufgezeigt werden.

Eine weitere Auswertung der Antworten des Online-Fragebogens der Begleitforschung zeigt auf, dass viele Projekte den Fokus ihrer Forschungsaktivitäten auf den Gebäudebestand richten. Abbildung 5.1-2 zeigt, dass in den Projekten ein großes Augenmerk auf die Aktivitäten „Sanierung/Optimierung“ und „Bestandsanalyse“ gelegt wird. Sie beschäftigen sich also mit Forschungsfragestellungen deren Lösung helfen kann, den vielfältigen deutschen Gebäudebestand zukunftsfähig zu machen. Daher werden in diesem Kapitel Projekte, die sich mit Bestandsgebäuden auseinandersetzen, genauer betrachtet.

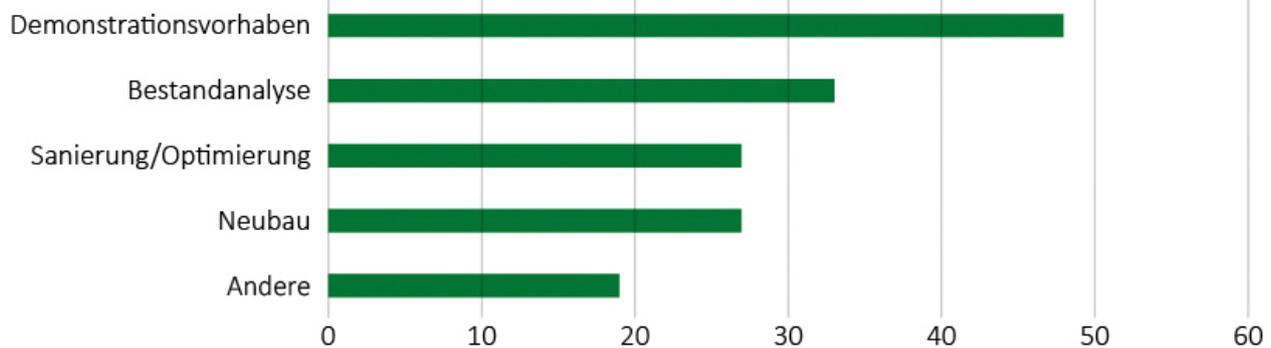


Abb. 5.1-2: Online-Fragebogen der BF: Welche Projektaktivität(en) setzen Sie in Ihrem Gebäude um? (Antworten zu 118 Gebäuden, Mehrfachauswahl möglich)

5.1.2 Fokus Bestand

Der deutsche Gebäudebestand ist mit 21,7 Mio. Wohn- und Nichtwohngebäuden betriebsbedingt verantwortlich für rund 30 % der Treibhausgasemissionen in Deutschland [6], [7]. Der Gebäudesektor spielt somit eine wichtige Rolle bei der Verfolgung der Klimaziele 2050 und der entsprechenden Reduzierung des Primärenergiebedarfs von Gebäuden um 80 % in Bezug auf das Vergleichsjahr 1990 und dem Gesamtziel der Klimaneutralität. Noch vor der Verabschiedung des Klimaschutzprogramms 2030 durch den Bundesrat Ende 2019 hatten die Deutsche Energie-Agentur (dena) und die Allianz für Gebäude-Energie-Effizienz (geea) berechnet, dass das Ziel des Klimaschutzplans der Bundesregierung für das Jahr 2030 im Gebäudesektor um bis zu 28 Mio. t CO₂-Emissionen überschritten wird, wenn die Sanierungsrate nicht ansteigt [6].

Um dieser Situation entgegenzutreten, ist im Klimaschutzprogramm 2030 u. a. eine steuerliche Förderung energetischer Gebäudesanierungen verankert, die z. B. die Dach- und Fassadendämmung, den Heizungsaustausch oder die Fenstererneuerung betrifft; zudem sollen die KfW-Förderprogramme ausgebaut werden [8]. Die Wirksamkeit dieser Maßnahmen wird in Politik- und Expertenkreisen kontrovers diskutiert, insbesondere da sie hauptsächlich den Wohngebäudebereich betreffen.

So spricht die Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen (DGNB) in einer Stellungnahme zum Klimaschutzprogramm 2030 zunächst von einem positiven Signal, dass dem Gebäudesektor eine wichtigere Rolle in der Verfolgung der Klimaschutz-

ziele als bisher zukommt. Bemängelt wird aber z. B. der Fokus auf Wohngebäude, Nichtwohngebäude böten einen großen Hebel aufgrund einer größeren Finanzkraft und anderer Eigentümerstrukturen [9]. Unabhängig von politisch bedingten Rahmenbedingungen und Förderstrukturen sind technische Innovationen im Gebäudebereich ein entscheidender Faktor bei der Gestaltung der Energiewende. Maßnahmen, die im Gebäudebestand umgesetzt werden, sollten eine größtmögliche Reduzierung von Treibhausgasemissionen erzielen. Erkenntnisse aus der Forschung, sei es bezüglich neuer Technologien, innovativer Prozesse oder auch Optimierungsmethoden, müssen daher den Weg aus der Wissenschaft in die Anwendung finden und dies mit einem möglichst geringen Zeitverzug.

5.2 Differenzierung Wohn- und Nichtwohngebäude

Bei der Unterscheidung zwischen Wohn- und Nichtwohngebäuden ergibt sich laut dena ein klares Ranking hinsichtlich der Fläche als auch des Endenergieverbrauchs. So sind Wohngebäude (Ein-, Zwei- und Mehrfamilienhäuser) mit einer insgesamt beheizten Fläche von 3.725.902 m² für 64 % des Endenergieverbrauchs im Gebäudesektor verantwortlich, während Nichtwohngebäude mit einer gesamten beheizten Fläche von 1.350.000 m² die restlichen 36 % zu verantworten haben (siehe Abbildung 5.2-1) [6].

In Bezug auf diese Gesamtbilanz scheinen zunächst Wohngebäude einen größeren Hebel zu haben als Nichtwohngebäude. Um große Effekte bezüglich

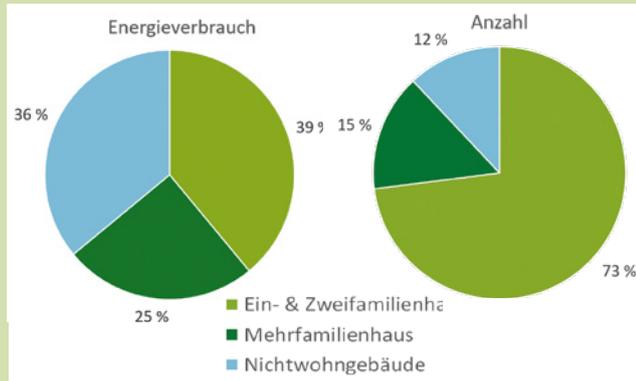


Abb. 5.2-1: Energieverbrauch und Anzahl je Gebäudetyp

der Reduzierung der Treibhausgasemissionen erzielen zu können, sind in diesem Kontext nicht die individuellen Einzelmaßnahmen an Gebäuden entscheidend. Um die Potentiale im Wohngebäudebereich in relevantem Umfang heben zu können, muss ein großer Anteil des heterogenen Wohngebäudebestands gebündelt betrachtet und Lösungsansätze für eine flächendeckende Umsetzung gefunden werden. Standardisierungen und typisierte Lösungen können dabei helfen, diesen Prozess der Effizienzsteigerung, Verbrauchsreduktion und somit der Emissionsreduktion zu beschleunigen. Übertragbare Konzepte, die auch unter realen Bedingungen eine prognostizierte Energieeinsparung erreichen, stehen daher auch im Fokus von Unternehmen außerhalb der wissenschaftlichen Forschung, was anhand der Zusammensetzung der Projektkonsortien abgeleitet werden kann. Forschungsprojekte, die dem Typ Demonstrator- oder Umsetzungsprojekt zugeordnet werden können, liefern hier wichtige Erkenntnisse. Anwendungseigenschaften und ins-

besondere Fehlerpotentiale innovativer Lösungsansätze werden aufgezeigt, und somit die Übertragbarkeit sowie die Skalierbarkeit nachgewiesen. Unter den durch die Förderinitiative Energie in Gebäuden und Quartieren betreuten Projekten haben im Rahmen der dritten Umfragephase des Online-Fragebogens 41 % der Projekte aus dem Gebäudebereich angegeben, dass sie ihre Untersuchungen auf Wohngebäude fokussieren, 58 % thematisieren Fragestellungen im Bereich der Nichtwohngebäude. Die Aufteilung auf Ein- und Mehrfamilienhäuser unter den Gebäudeprojekten im Wohngebäudebereich ist in Abbildung 5.2-2 dargestellt. Die Anzahl der Mehrfamilienhäuser überwiegt in den Forschungsprojekten, wohingegen Einfamilienhäuser seltener betrachtet werden. So steht auch im zweiten externen Projektbeitrag die-

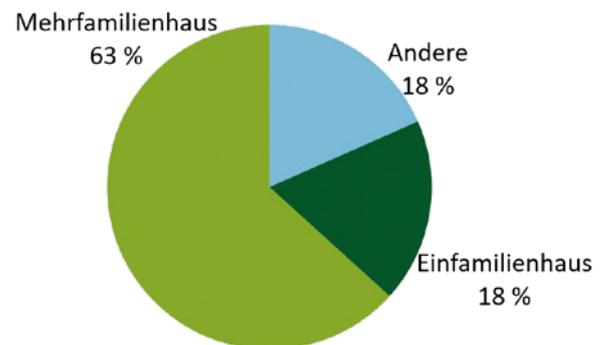


Abb. 5.2-2: Online-Fragebogen der BF: Um welchen Wohngebäudetyp handelt es sich? (Antworten zu 49 Gebäuden)

ses Kapitels die Sanierung und Betriebsoptimierung eines Mehrfamilienhauses im Fokus der Untersuchungen (siehe Kapitel 5.7).

Im Wohngebäudebereich ist eine komplexe Eigentümerstruktur mit unterschiedlichsten Interessen sowie oft fehlender ökonomischer Motivation zu einer Sanierung oder Optimierung vorzufinden [10]. Besonders hervorzuheben ist in diesem Kontext das Eigentümer-Mieter-Verhältnis. Auf Eigentümerseite können Investitionen teilweise nur über Fördermittel und eine Modernisierungsumlage refinanziert werden; es besteht dennoch ein hohes Investitionsrisiko ohne direkten Eigennutzen [11]. Dem Mieter kommen hingegen sinkende Energiekosten zu Gute, welche eine aufgrund der Modernisierungsumlage steigende Kaltmiete allerdings häufig nicht ausgleichen [11]. Durchweg positive Assoziationen hinsichtlich Sanierungs- und Optimierungsmaßnahmen treten daher seltener bei Eigentümern und Nutzern auf. Bei Selbstnutzung der Immobilie sieht dieser Sachverhalt anders aus. Der Eigentümer ist gleichzeitig der Nutzer und hat somit ein gesteigertes Interesse daran, durch Sanierungsmaßnahmen oder eine Betriebsoptimierung energetische, komfortbezogene oder auf lange Sicht auch finanzielle Vorteile zu nutzen.

Im Bereich der Nichtwohngebäude ergibt sich aufgrund der oft größeren quadratmeterbezogenen Verbräuche ein größeres Einsparpotential bezüglich einzelner Gebäude. Eine Sanierungsmaßnahme, wie z. B. die energetische Sanierung der Fassade eines Bürogebäudes, hat so gesamtbilanziell einen größeren Effekt als die Fassadensanierung eines Einfamilienhauses. Ebenso kann in diesem Zusammenhang

eine Betriebsoptimierung eines einzelnen Gebäudes eine größere Energieeinsparung hervorrufen als z. B. die Betriebsoptimierung eines Einfamilienhauses. Darüber hinaus ist die Eigentümerstruktur nicht so komplex wie im Wohngebäudebereich. Dieser Vorteil scheint sich in der Gebäudeauswahl der Forschungsprojekte widerzuspiegeln. Fast die Hälfte der untersuchten Gebäude (Nicht- und Wohngebäude) stehen im Eigentum eines öffentlichen Trägers (siehe Abbildung 5.2-3).

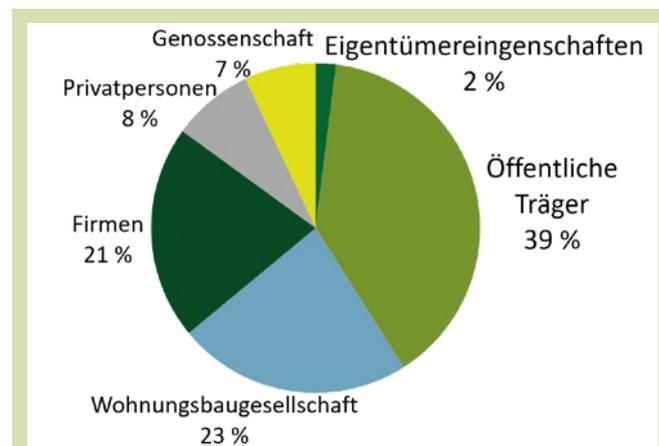


Abb. 5.2-3: Online-Fragebogen der BF: Bitte geben Sie die Eigentumsverhältnisse in Ihrem Gebäude in Prozent an. (Antwort zu 57 Gebäuden)

Die Nutzung der Nichtwohngebäude, die im Rahmen von Forschungsprojekten der Förderinitiative Energie in Gebäuden und Quartieren untersucht werden, sind in Abbildung 5.2-4 dargestellt. Die unter „Andere“ gezählten Gebäude umfassen diverse Nichtwohngebäude wie z. B. Depot- und Archivgebäude, Hotels oder Theater mit einer speziellen Nutzung sowie einer geringeren Verbreitung im Gebäudebestand und

dementsprechend im Nichtwohngebäudebereich eher untypischen Anforderungen. Die Angaben zum Nichtwohngebäudetyp zeigen auch, dass viele Forschungsprojekte Gebäude mit typischer Nutzungsart wie Schulen, Institute oder Verwaltungsgebäude in den Fokus ihrer Untersuchungen stellen, die sich zudem oft in öffentlichem Eigentum befinden. So existieren in Deutschland im Bildungsbereich über 32.500 Schulen der Allgemeinbildung [12]. Der kommunale Investitionsrückstau im Bereich Bildung für das Jahr 2018 in Höhe von 42,8 Mrd. € [13] und der damit einhergehende Sanierungsstau deuten darauf hin, dass viele dieser Gebäude unter energetischen Gesichtspunkten ein Einsparpotential aufweisen. Schulgebäude können somit ein wichtiger Baustein zur Reduktion der Treibhausgasemissionen sein. Der erste, externe Projektbeitrag dieses Kapitels (siehe

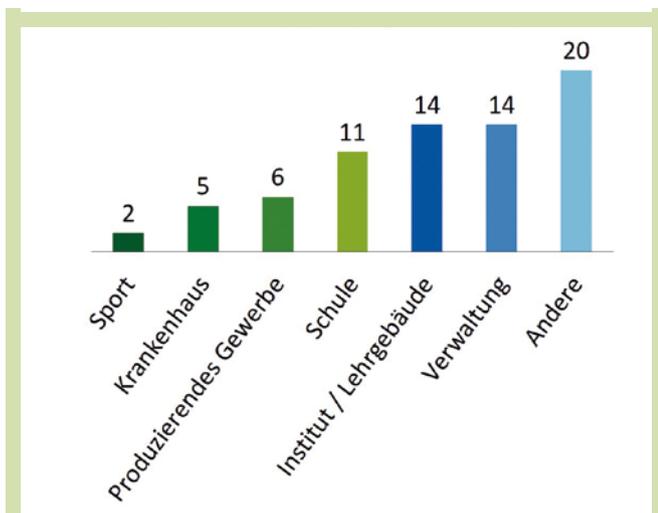


Abb. 5.2-4: Online-Fragebogen: Um welchen Nichtwohngebäudetyp handelt es sich? (Antworten zu 72 Gebäuden)

Kapitel 5.6) berichtet daher von der Sanierung einer Schule zur Plusenergieschule.

5.3 Energetische Bestandssanierung

Die energetische Bestandssanierung ist ein zentrales Thema der Energiewende. Jedoch liegt die Sanierungsrate bei Wohngebäuden derzeit bei etwa 1 %. Die Sanierungsrate muss nach einer Studie zufolge bei etwa 1,4–2 % liegen, sodass die Energiewende hinsichtlich der zu erreichenden Klimaschutzziele 2050 gelingen kann [14].

Im Folgenden werden Sanierungserfahrungen und Erkenntnisse aus Wohn- sowie Nichtwohngebäude-Projekten vorgestellt und die Anreize, Probleme sowie Hemmnisse der energetischen Bestandssanierung aufgezeigt. Dabei stellt sich neben der Frage, welche Anreize für Sanierungsmaßnahmen bestehen, auch die Frage, wie wirtschaftlich und realisierbar die Umsetzbarkeit in den Projekten war. Zudem bietet ein Rückblick auf den Projektablauf Erkenntnisse über die prognostizierten Effekte und ermöglicht Verbesserungsvorschläge für anstehende Projekte.

Ein zentrales Hemmnis der Bestandssanierung kann beispielsweise die Dauer der Sanierungsmaßnahme sein. In den Projekten der Förderinitiative ist zu erkennen, dass die Sanierungsmaßnahmen häufig länger als sechs Monate in Anspruch nehmen (siehe Abbildung 5.3-1). Gerade in der Wohngebäudesanierung entsteht eine wirtschaftliche Doppelbelastung, zum einen durch die Kosten der Sanierungsmaßnahme sowie zum anderen durch den Entfall der Mieteinnahmen.

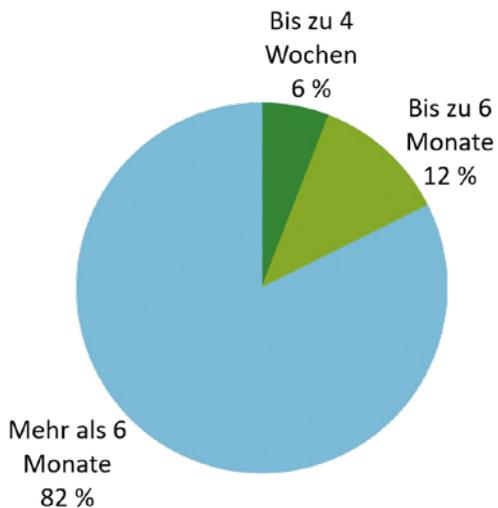


Abb. 5.3-1: Online-Fragebogen: Wie lange dauern bzw. werden die Sanierungsmaßnahmen voraussichtlich dauern? (Antwort zu 17 Gebäuden)

5.4 Energetische Betriebsoptimierung bei Bestandsgebäuden

Die energetische Betriebsoptimierung von Wohn- sowie von Nichtwohngebäuden bedeutet die Anpassung betrieblicher Funktionen der Gebäudetechnik. Neben der Bestandssanierung ermöglicht die Betriebsoptimierung der Anlagentechnik die Erkennung der Abweichungen vom Ist- zum Planstand, sowie eine Reduzierung der Mängel in der Regelungs- und Steuerungstechnik. Mängel und Regel- und Steuerungsfehler entstehen in der Regel durch unzureichende Kenntnisse über die Zusammenhänge des Energiekonzepts, sowie durch mangelnde Erfahrung hinsichtlich energiesparender Betriebsführung. Zudem wird die Programmierung der

Regelungs- und Steuerungsanlage häufig zu spät im hektischen Bauablauf betrachtet und kann somit nicht ausreichend ausgearbeitet werden. Die standardmäßige, unzureichende, messtechnische Ausstattung der Anlagentechnik ist eher auf die Nutzerzufriedenheit als auf die Energieeffizienz ausgelegt. Die messtechnische Ausstattung wird auf das Funktionieren der Einzelkomponente ausgerichtet, anstatt auf die Analyse und Optimierung des Strom- und Wärmeverbrauchs. Das Wissen hinsichtlich der Auslegung sowie Spezifikation der Anlagentechnik geht zudem teilweise aufgrund der mehrjährigen Dauer des Planungs- und Bauablaufs sowie durch ggfs. entstehende Planerwechsel in Abhängigkeit der Leistungsphasen verloren. Eine strategische Betriebsoptimierung mit dem langfristigen Ziel der Kombination aus Nutzerzufriedenheit und der Energiekostenreduzierung wird nur in seltenen Fällen umgesetzt [15]. Bei einer kontinuierlich ansteigenden Energieeinsparung durch eine Betriebsoptimierung ist die höchste Energieeinsparung des Energiebedarfs von etwa 10–15 % erst nach 4–5 Jahren zu erwarten. Jedoch kann die Betriebsoptimierung bereits nach 2–3 Jahren gewinnbringend sein [16]. In den befragten Forschungsprojekten der Förderinitiative Energie in Gebäuden und Quartieren liegt die Betriebsoptimierung im Zentrum der Betrachtung, direkt gefolgt vom Monitoring (siehe Abbildung 5.4-1). Das Potential der Betriebsoptimierung wurde in diesen Projekten erkannt und genutzt. Der Einsatz neuer Technologien wurde dagegen weniger fokussiert. So betrachtet der dritte externe Projektbeitrag in diesem Kapitel die automatisierte, auf Big Data Technologien basierende Erkennung von

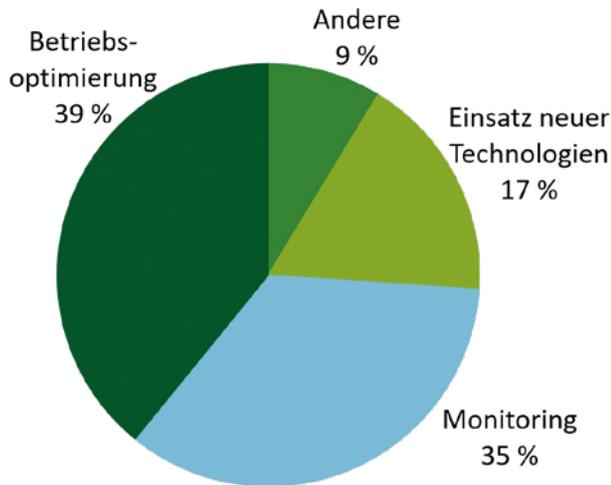


Abb. 5.4-1: Online-Fragebogen: Was ist der Fokus bei Ihrer Bestandsanalyse und Sanierung/Optimierung? (Antworten zu 46 Gebäuden)

Performance Gaps im Gebäudebetrieb (siehe Kapitel 5.8).

In der gebauten Praxis findet die Betriebsoptimierung weniger Interesse als bei Forschungsprojekten. Aus welchen Gründen wird die Betriebsoptimierung in den Forschungsprojekten analysiert, die in standardmäßigen Umsetzungsprojekten selten umgesetzt wird? Interessant ist daher der Anreiz zur Berücksichtigung der Betriebsoptimierung. In den Forschungsprojekten kann anhand des Online-Fragebogens ermittelt werden, dass als erstgenannte Gründe für eine Betriebsoptimierung die Energieeffizienzsteigerung und die Kostensenkung stehen. Die Reduzierung von Emissionen steht an dritter Stelle, direkt gefolgt von dem Ziel, den Nutzerkomfort zu verbessern (siehe Abbildung 5.4-2). Anhand nachfolgender Projektberichte sollen Erfah-

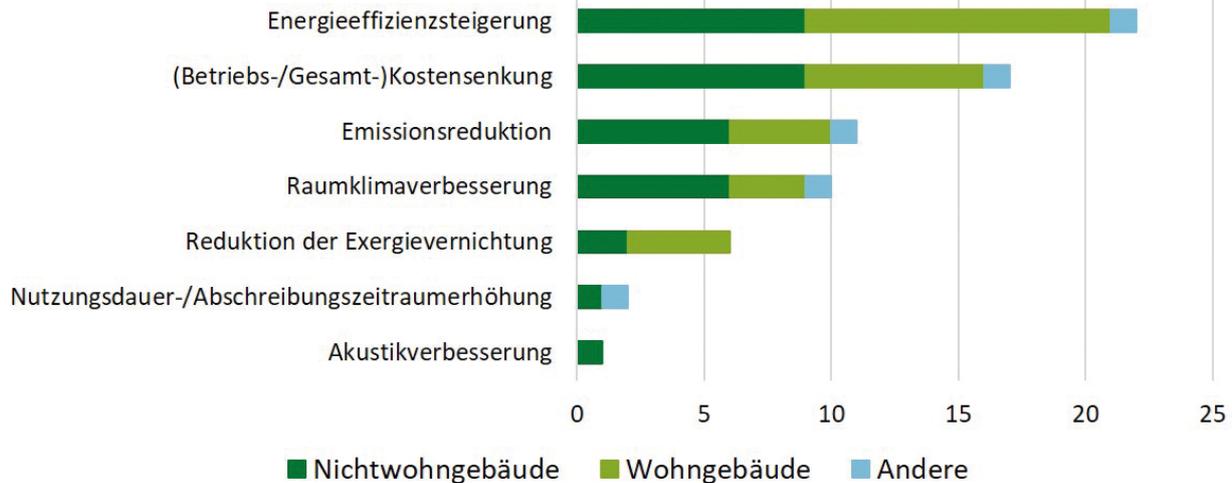


Abb. 5.4-2: Online-Fragebogen: Mit welchem Ziel führen Sie die Betriebsoptimierung durch? Welchen Gebäudetyp betrachten Sie in Ihrem Projekt? (Antworten zu 28 Gebäuden)

rungen zur realen Energie- und Kosteneinsparung nach Umsetzung der Betriebsoptimierung geteilt werden. Konnten der prognostizierte Effekt und die Wirtschaftlichkeit erreicht werden oder wurde die Einsparung sogar übertroffen?

Aufgrund der Vielzahl unterschiedlicher Möglichkeiten zur Betriebsoptimierung werden effiziente Maßnahmen aufgezeigt, um auch in weiteren Projekten die Motivation zu erhöhen diese Energieeinsparmaßnahmen umzusetzen. Zudem können Erfahrungen aus dem Umsetzungsprozess dazu beitragen, die Betriebsoptimierung stärker als Effizienzmaßnahme einzusetzen.

5.5 Energetische Sanierung mit zusätzlicher Betriebsoptimierung

Sanierungsmaßnahmen bieten durch die Kombination mit einer Betriebsoptimierung eine zusätzliche Effizienzsteigerung bei geringen, zusätzlichen Kosten für die Betriebsoptimierung von etwa 5 % der Energiekosten. Die Energieeffizienz von Wohn- sowie Nichtwohngebäuden kann durch eine energetische Sanierung der Anlagentechnik und einer darauffolgenden Betriebsoptimierung um etwa 35 % gesteigert werden. [16]

In 14 Projekten der Förderinitiative wurde neben der energetischen Sanierung ebenfalls eine Betriebsoptimierung durchgeführt. Anhand der externen Projektberichte soll ein Einblick gegeben werden, welche Gründe für oder gegen diese Kombination sprechen. Welche Vor- oder Nachteile hat diese Kombination und welche Erkenntnisse aus dem Umsetzungsprozess können auf andere Projekte über-

tragen werden. Kann abschließend eine Erkenntnis aus dem Projektablauf bezüglich der Sanierung und Betriebsoptimierung mitgenommen werden? Rückblickend auf den abgeschlossenen Projektablauf ist auch die erwartete und reale Wirtschaftlichkeit der Kombination aus Sanierung und Betriebsoptimierung für weitere Projekte interessant. Rentiert sich die Investition in die Betriebsoptimierung, oder gibt es andere Sanierungsmaßnahmen die kosteneffizienter sind? Kann infolge des Projektablaufs abschließend eine Erkenntnis bezüglich der Sanierung in Kombination mit der Betriebsoptimierung gegeben werden?

In den folgenden Projektberichten stellen daher drei Forschungsprojekte ihre Erfahrungen aus dem Bereich der energetischen Sanierung sowie der Betriebsoptimierung vor.

Literatur:

- [1] Climate Transparency, 2019. Brown to Green – The G20 transition to a low-carbon economy. <https://www.climate-transparency.org/wp-content/uploads/2019/11/Brown-to-Green-Report-2019.pdf> (abgerufen am: 13.12.2019).
- [2] Statistische Ämter des Bundes und der Länder (Hrsg.), 2015.: Zensus 2011, Gebäude- und Wohnungsbestand in Deutschland, Hannover: Landesamt für Statistik Niedersachsen (LSN).
- [3] Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena), Stillstand bei energetischer Gebäudesanierung überwinden, Pressemitteilung, 12.10.2017, <https://www.dena.de/newsroom/meldungen/2017/stillstand-bei-energetischer-gebäude-sanierung-ueberwinden/> (abgerufen am: 19.12.2019)
- [4] Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena), dena-Gebäudereport – Sanierungsrate weiterhin viel zu gering, Pressemitteilung, 06.02.2017. <https://www.dena.de/newsroom/meldungen/2017/dena-gebäudereport-sanierungsrate-weiterhin-viel-zu-gering/> (abgerufen am: 13.12.2019).
- [5] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), „Innovationen für die Energiewende“: Bundesregierung beschließt 7. Energieforschungsprogramm, Pressemitteilung, 19.09.2018 <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Pressemitteilungen/2018/20180919-bundesregierung-beschliesst-7-energieforschungsprogramm.html> (abgerufen am: 13.12.2019).
- [6] Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena), dena-GEBÄUDEREPORT KOMPAKT 2019 „Statistiken und Analysen zur Energieeffizienz im Gebäudebestand“, 2019
- [7] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nuk-

- leare Sicherheit (BMU), Klimaschutz in Zahlen - Fakten, Trends und Impulse deutscher Klimapolitik - Ausgabe 2019, 2019
- [8] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU), Klimaschutzprogramm 2030 der Bundesregierung zur Umsetzung des Klimaschutzplans 2050, 2019
- [9] Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen (DGNB), Stellungnahme der DGNB zum Klimaschutzprogramm 2030, 02.10.2019
- [10] Weiß, J., Bierwirth, A., Knoefel, J., März, S., Kaselofsky, J., Friege, J., Entscheidungskontexte bei der energetischen Sanierung- Ergebnisse aus dem Projekt Perspektiven der Bürgerbeteiligung an der Energiewende unter Berücksichtigung von Verteilungsfragen, 2018
- [11] Mellwig, P., Pehnt, M., Sozialer Klimaschutz in Mietwohnungen - Kurzgutachten zur sozialen und klimagerechten Aufteilung der Kosten bei energetischer Modernisierung im Wohnungsbestand, 2019
- [12] Statistische Bundesamt (Destatis), Bildung und Kultur – Allgemeinbildende Schulen – Schuljahr 2018/2019, Fachserie 11 Reihe 1, 2019
- [13] Krone, E., Scheller, H., KfW-Kommunalpanel 2019, KfW Bankengruppe, 2019
- [14] Energiesysteme der Zukunft (ESYS), Bundesverband der deutschen Industrie e. V. (BDI), Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena): Expertise bündeln, Politik gestalten – Energiewende jetzt! Essenz der drei Grundsatzstudien zur Machbarkeit der Energiewende bis 2050 in Deutschland, 2019 URL: https://www.dena.de/fileadmin/dena/Dokumente/Themen_und_Projekte/Energiesysteme/dena-Leitstudie/Expertise_buendeln_Studienvergleich.pdf (abgerufen am 30.07.2019).

- [15] Bauer, M., Mösler, P., Schwarz, M., Green Building- Leitfaden für nachhaltiges Bauen, Drees & Sommer (Hrsg.) 2. Auflage, Kapitel C4 S. 141-142, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2007, 2013,
- [16] Hänny, D., Energetische Betriebsoptimierung – Ökologie trifft Ökonomie, 2014, URL: <https://www.energie-experten.ch/de/business/detail/energetische-betriebsoptimierung-oekologie-trifft-oekonomie.html> (abgerufen am 11.02.2020)

Kontakt:

RWTH Aachen
Lehrstuhl für Gebäude- und Raumklimatechnik

Tobias Beckhölter, M.Sc.
tbeckhoelter@eonec.rwth-aachen.de

Sandra Ladermann, M.Sc.

Dr.-Ing. Tanja Osterhage
tosterhage@eonec.rwth-aachen.de

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dirk Müller

5.6 Plusenergieschule Detmold

5.6.1 Sanierung

5.6.1.1 Sanierungskonzept und Anreiz

Das Detmolder Plus-Energie-Berufskolleg ist ein Sanierungsprojekt, bei dem drei miteinander verbundene Riegelgebäude inklusive einer Turnhalle aus den Jahren 1954 bis 1962 zu einer primär-energetischen Plus-Energie-Schule saniert wurden. Beweggrund der Sanierung war die altersbedingte Erneuerung der Verglasung, worauf aufbauend ein umfangreiches Sanierungskonzept in Anlehnung an den Passivhaus-Standard entwickelt wurde, bei dem zum einen bestehende Konstruktionen und technische Infrastrukturen möglichst zu erhalten waren und zum anderen ein ressourcenschonender Materialeinsatz umgesetzt werden sollte.

Im Wesentlichen umfasste die Sanierung folgende Leistungen:

- Austausch Fenster ($U_w = 0,73 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$)
- Montage vorgefertigter Wandelemente aus Holz und Zellulosedämmung ($U = 0,10 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$)
- Zellulosedämmung oberster Geschossdecken bzw. Dachflächen genutzter Dachräume ($U = 0,10 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$)
- Dämmung und Abdichtung erdberührender Außenwände ($U = 0,09 \text{ bis } 0,15 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$)
- CO₂-gesteuerte maschinelle Lüftung (20 m³/(hPers).; WRG im Jahresmittel: ca. 73 %)
- Außenliegender Sonnenschutz
- Dachintegrierte Photovoltaikmodule (352 kW_{peak}).

Überdies erfolgt die Wärmeversorgung über das Fernwärmenetz der Stadtwerke Detmold, die aufgrund einer Kraftwärmekopplung aus Biomasseabfällen einen Primärenergiefaktor f_{PE} von 0,0 aufweist und somit einen wesentlichen Beitrag zur primär-energetischen Plusenergie-Bilanz leistet. Das Konzept des Architekturbüros papeodersemke basierte auf einer Ökobilanzierung, die eine Fassadensanierung mit Holzstegträgern in vorgefertigter Holztafelbauweise sowohl in wirtschaftlicher als auch in ökologischer Hinsicht als am unbedenklichsten auswies. Bei den verwendeten Holzstegträgern handelt es sich um wärmebrückenoptimierte I-Träger. Die Vorfertigung der Holztafelelemente ermöglichte einen Sanierungsfortschritt von ca. 1.000 m² je Woche, sodass die Bauzeit stark verkürzt und die Arbeiten größtenteils während der Schulferien realisiert werden konnten. Diese Bauweise gestattete nicht nur den Einsatz nachwachsender Rohstoffe, sondern auch die Berücksichtigung von Maßtoleranzen der unebenen und schiefen Bestandskonstruktion. Mit einem konventionell geklebten WDVS-System hätte dies nur mit einem erheblichen Mehraufwand realisiert werden können.

5.6.1.2 Erfahrungen für zukünftige Vorhaben

Eine wichtige Erfahrung aus dem Planungsprozess bestand darin, neben den Energiekennwerten einer Bilanzierung gemäß des Monatsbilanzverfahrens auch ein energetisches Performance-Ziel mittels thermodynamischer Simulation zu überprüfen und Energiekennwerte zielführend zu reflektieren. Dies bedeutet unter anderem auch, jene Perfor-

mance-Ziele gegenüber sehr ambitionierten Kennwerten zu priorisieren, um kritische Investitionsentscheidungen besser abwägen zu können.

So wurde beispielsweise in dem Projekt die sehr kostenintensive nachträgliche Dämmung der Bodenplatte aus dem Sanierungskonzept genommen. Dadurch erfüllte der Campus gemäß der Bilanzierung zwar nur noch den EnerPHit-Plus Standard statt den Passivhaus-Standard, das Konzept gewährleistete aber weiterhin das Performance-Ziel der primär-energetischen Plus-Energie-Schule.

Darüber hinaus zeigte sich im Betrieb und insbesondere im Vergleich zum Bestandsgebäude, dass die kontrollierte Be- und Entlüftung unumgänglich ist, um ganzjährig eine hygienisch unbedenkliche Luftqualität zu gewährleisten, jedoch zugleich die reine Betrachtung des CO₂-Gehalts in der Luft im Winter zu kritischen Unterschreitungen der Raumluftfeuchte führen kann. Eine Reduzierung der Luftmenge unter die normativen Empfehlungen im Winter wurde somit erforderlich.

5.6.2 Potenzial Gebäudetyp

Sowohl Wohngebäude als auch Nichtwohngebäude besitzen ein großes Potenzial für Sanierungen sowie Betriebsoptimierungen. Unsere Erfahrungen zeigen hier, dass jedoch die Barrieren und Möglichkeiten andere sind:

In Wohngebäuden kann der individuelle Nutzer bereits viel Energie einsparen, indem er seine persönliche Komfortgrenze ausreizt und das Heizverhalten an die Nutzungszeiten anpasst. Allerdings besteht in vielen Fällen eine Investitionshemmschwelle, insbe-

sondere wenn es durch Eigentümergemeinschaften vermietetes Eigentum ist. Hingegen bedarf es auch nur moderater Maßnahmen, wenn der Nutzer ohnehin durch Beruf und Freizeitgestaltung eher geringe Präsenz in der Wohnung zeigt und ein adaptives Heizverhalten betreibt.

In Nichtwohngebäuden bietet dagegen das Engagement eines einzelnen Nutzers nur geringes Potenzial. Systemtemperaturen sowie Regelstrategien werden i. d. R. zentral gesteuert und meist auf einen beschwerdefreien Betrieb hin eingestellt, da aus individuellen Beschwerden nur schwer konkrete Ursachen hergeleitet werden können. Dies bietet jedoch zugleich das große Potenzial, zentrale Maßnahmen umzusetzen und nutzungsadaptierte Regelstrategien zu integrieren, die sowohl das Aufheizverhalten als auch Wärmegewinne berücksichtigen.

Somit gilt unabhängig von der Größe des Potenzials, dieses zu nutzen und vorhandene Barrieren zu brechen und realistische Möglichkeiten wahrzunehmen.

5.6.3 Betriebsoptimierung

5.6.3.1 Potenzial der Betriebsoptimierung

Maßgebend für die Betriebsoptimierung eines Gebäudes ist die Anpassung der Betriebszeiten als auch der Soll-Zustände an die gebäudeindividuellen Begebenheiten. Dies beinhaltet neben dem Energieverbrauch vor allem das Feedback der Nutzer und dessen dezidierte Ursachenforschung.

Die Herausforderung liegt vor allem in den Zielkonflikten, wie sich beispielsweise beim Raumklima zeigt. So führt im Winter ein hinreichend hygieni-

scher Luftwechsel sowie ein hohes Maß an thermischem Komfortempfinden zugleich zu erhöhtem Heizwärmebedarf und niedriger relativer Luftfeuchte, was unter Umständen zu gesundheitlichen Beeinträchtigungen führen kann.

Im Detmolder Plus-Energie-Berufskolleg erwies sich die sukzessive Betriebsoptimierung und damit die Anpassung der Sollwerte und der Laufzeiten an die gebäudetypischen Randbedingungen als wichtige Maßnahme, um einen Betrieb zu ermöglichen, der den energetischen Zielen gerecht wird und den Nutzern einen hinreichenden Komfort bietet.

5.6.3.2 Maßnahmen am Detmolder Plus-Energie-Berufskolleg

Die Betriebsoptimierung zielte auf die Verbesserung des thermischen Komforts, die Reduktion des Energieverbrauchs und die Erhöhung der relativen Luftfeuchtigkeit während der Heizperiode ab.

Im ersten Betriebsjahr wurden die Systeme seitens der ausführenden Firmen entsprechend ihrer Erfahrung für energetisch hochwertige Schulen eingestellt. Hieraus resultierten ein aktiver Heizbetrieb während der Nutzungszeit (06:00–13:30 Uhr), eine außenlufttemperaturgeführte Heizkurve mit der Steilheit von 1,0 sowie maximale Vorlauftemperatur von 55 °C. Darüber hinaus fand in den Morgenstunden ein zweistündiger Spülbetrieb der Lüftungsanlage den Empfehlungen aus Feist, W. [1] entsprechend statt. Mit diesen Systemeinstellungen in Kombination mit einem unzureichenden hydraulischen Abgleich wurde zwar das Ziel der primärenergetischen Plus-Energie-Schule auch im

ersten Betriebsjahr erreicht (siehe Abb. 5.6-1). Ab 2 °C Außenlufttemperatur führten die Einstellungen allerdings zu einer deutlichen Überschreitung der gewünschten Raumlufttemperatur von maximal 24 °C, was in verstärktem Fensteröffnen endete.



Abb. 5.6-1: Primärenergetische Plusenergiebilanz Detmolder Plus-Energie Berufskolleg [IFE TH OWL]

Es zeigte sich, dass die installierten Thermostatköpfe abweichend zu den geforderten Einstellungen (Ventil geschlossen bei 22 °C) erst bei 24–25 °C schlossen. Zugleich waren die Massenströme der Heizkörper nicht korrekt geregelt; ein hydraulischer Abgleich war nicht gegeben.

Die Nutzer verwiesen darüber hinaus auf eine unzureichende Raumluftqualität, obwohl CO₂-Konzentrationen von durchschnittlich unter 1.000 ppm und von maximal 1.500 ppm gemessen wurden. Es stellte sich jedoch heraus, dass im Winter des ersten Be-

triebsjahres zu 79 % der Nutzungszeit eine relative Luftfeuchtigkeit unter 40 % in den Referenzklassenräumen herrschte. Zu 32 % der Zeit lag diese sogar unter 30 % relative Luftfeuchte. Somit waren selbst für nicht sensible Menschen kritisch zu bewertende Zustände erreicht, Alsmo, T., Alsmo, C. [2].

Die Individualisierung des Heizbetriebes am Detmolder Plus-Energie-Berufskolleg war besonders herausfordernd, weil die Unterteilung der Heizkreise nicht die unterschiedlichen Randbedingungen und Nutzungen der Schulklassen berücksichtigen konnte. In dem Objekt sind die Heizkreise den jeweiligen Gebäudeteilen zugeordnet. Sie können nur gebäudespezifisch geregelt werden, sodass sowohl die Klassenzimmer im Untergeschoss, als auch die Computerräume und Standardklassenzimmer im Obergeschoss, wie auch die Lehrerzimmer dem gleichen Heizkreis zugeordnet sind und folglich keinerlei nutzungsspezifische Anpassungen hinsichtlich Systemtemperaturen und Laufzeit erfolgen kann. Eine Trennung der Etagen im Heizkreis hätte in diesen Gebäuden nur mit einem erheblichen investiven Aufwand erfolgen können, da die Bestandsverteilung in Form eines Tichelmann-Systems mittels Strangverteilung ausgeführt ist. Die Differenzierungsmöglichkeiten beschränken sich dementsprechend auf die raumindividuelle Einstellung des Thermostatventils. Da sich die Thermostatköpfe in einer Nische befinden und auch die Raummöblierung eine schnelle Reaktion auf die Raumtemperatur verhindert, geschieht dies allerdings nur begrenzt. Das Thermostatverhalten ist nicht exakt für die Räume prognostizierbar und nutzungsindividuell regelbar, da beispielsweise die witterungsgeführte

Vorlauftemperatur an kalten Tagen einen größeren Einfluss im Vergleich zu milden Tagen nimmt oder bei entsprechender Möblierung in der Umgebung des Thermostatkopfes ein vom Raummittel abweichendes Mikroklima herrscht. So musste die zentrale Heizungsregelung einer Kompromisseinstellung folgen, da auch die Nachrüstung von Fernfühlern an den Thermostatköpfen unter Berücksichtigung der Vandalismussicherung in Schulen nicht hätte umgesetzt werden können.

Auf Basis eines mit den Messwerten kalibrierten thermodynamischen Simulationsmodells wurde ein idealer Soll-Betrieb entwickelt; Anpassungen seitens des hydraulischen Abgleichs und der Thermostatkopfeinstellung wurden umgesetzt. Die Regelung sieht eine intensive Aufheizphase in den

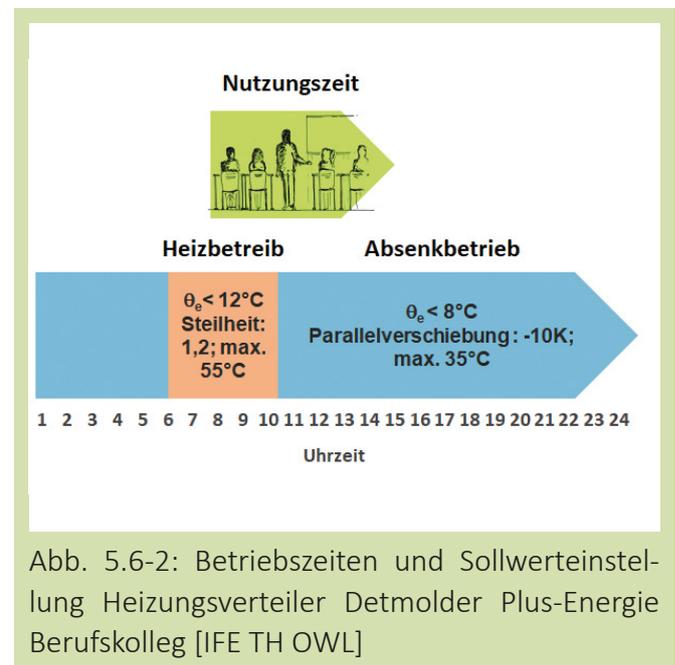


Abb. 5.6-2: Betriebszeiten und SollwertEinstellung Heizungsverteiler Detmolder Plus-Energie Berufskolleg [IFE TH OWL]

Morgenstunden mit einem reduzierten Betrieb nach 2,5-stündiger Nutzung vor (siehe Abb. 5.6-2) und wurde sukzessiv unter Berücksichtigung von Raumklimamessungen in repräsentativen Räumen angepasst.

Anzumerken ist hierbei, dass der Absenkbetrieb bis zu einer Außentemperatur von 8 °C nur für die Klassenräume im Untergeschoss erforderlich ist. Für die Standardklassenzimmer mit Hüllflächen in Passivhaus-Qualität könnte stattdessen theoretisch auf den Absenkbetrieb verzichtet werden. Hier bedürfte es lediglich der morgendlichen Aufwärmphase. Die internen Wärmequellen reichen hierbei aus, um eine Temperatur von ca. 22 °C zu halten.

Neben den Anpassungen an der Heizungsverteilung wurde zudem die morgendliche Spüllüftung sowie der Wochenendbetrieb deaktiviert und der Volumenstrom von ca. 25 m³/(h Pers.) auf ca. 14,5 m³/(h Pers.) reduziert, um zugleich die Luftfeuchtigkeit in den Räumen zu erhöhen.

5.6.3.3 Ergebnisse der Betriebsoptimierung

Die umgesetzten Sanierungsmaßnahmen in Kombination mit den Betriebsoptimierungen ließen in den beiden Monitoring-Klassenzimmern eine Verringerung der klima- und standortbereinigten Heizenergie von ca. 90 % zu. Die Betriebsoptimierungen erbrachten hierbei allein eine Reduktion von 53 % im Vergleich zum ersten Betriebsjahr (2016) (siehe Abb. 5.6-3).

Die Maßnahmen zur Erhöhung der relativen Luftfeuchtigkeit im Winter zeigten hingegen nur mäßige Wirkung. Zwar konnte mit jedem Betriebsjahr

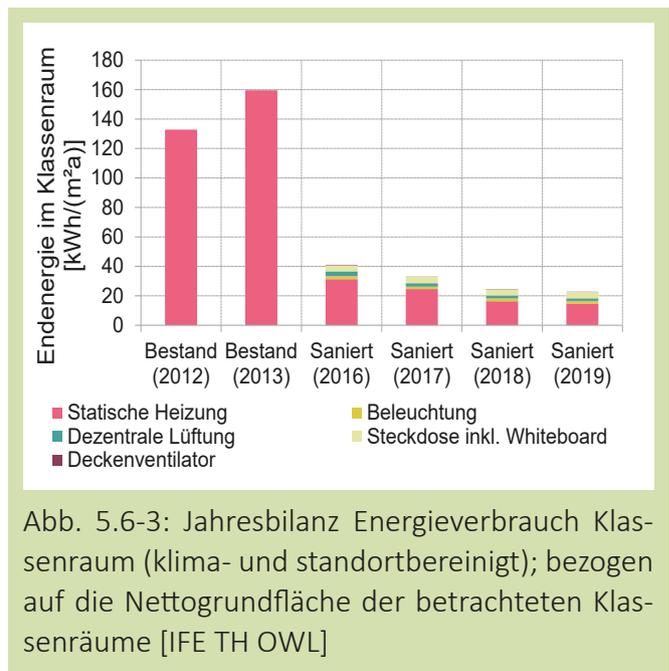


Abb. 5.6-3: Jahresbilanz Energieverbrauch Klassenraum (klima- und standortbereinigt); bezogen auf die Nettogrundfläche der betrachteten Klassenräume [IFE TH OWL]

eine Steigerung der relativen Luftfeuchtigkeit im Vergleich zum ersten Betriebsjahr 2016 erreicht werden (siehe Abb. 5.6-4), allerdings nicht in dem Maße, um den Bedürfnissen der Nutzer – mit Blick einerseits auf eine angenehme Luftfeuchtigkeit, andererseits auf hygienisch unbedenkliche Luftqualität – gerecht zu werden. Wie Abb. 5.6-4 und Abb. 5.6-5 entnommen werden kann, war die Luftfeuchtigkeit der Innenraumluft bei niedrigen Außenlufttemperaturen im Bestand höher als nach der Sanierung. In der Betrachtung der CO₂-Konzentration im Raum zeigt sich allerdings, dass dies vornehmlich aufgrund eines reduzierten Luftwechsel möglich war. Somit betrug die CO₂-Konzentration im Bestand im Median bis zu 3.000 ppm, was hygienisch kritischen Zuständen entspricht (siehe [3]). Ohne signifikante Einbußen in der Luftqualität oder einer aktiven Be-

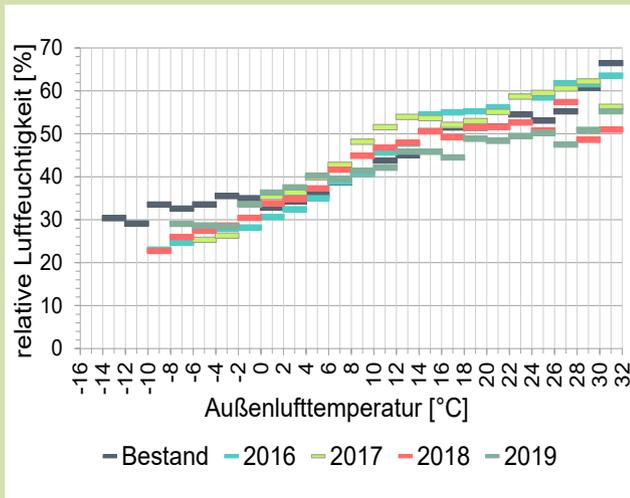


Abb. 5.6-4: Mediane der relativen Luftfeuchtigkeit während der Nutzung in Abhängigkeit zur Außentemperatur [IFE TH OWL]

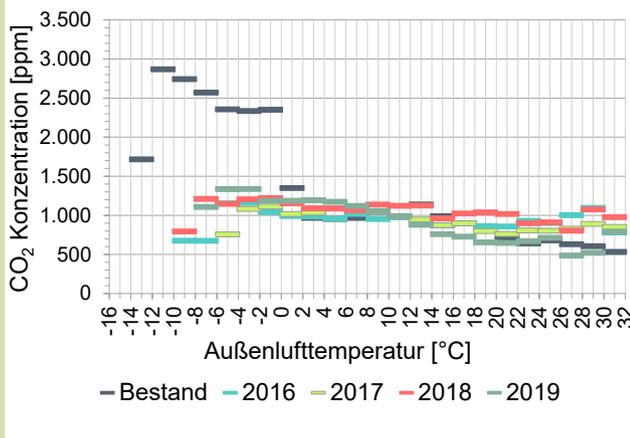


Abb. 5.6-5: Mediane des CO₂-Gehalts der Innenraumluft im Bestand und Sanierung in Abhängigkeit zur Außentemperatur [IFE TH OWL]

feuchtung wird unter den gegebenen Umständen keine weitere Möglichkeit gesehen, im Winter eine höhere relative Luftfeuchtigkeit bereitzustellen. Es folgten daraus weitere Abstimmungen zwischen dem Kreis Lippe als Gebäudeeigentümer und der Schule als Nutzer, die zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht abgeschlossen sind.

5.6.3.4 Erfahrungen aus der Betriebsoptimierung

Für die Betriebsoptimierung erwies es sich als äußerst wichtig, dass die Mediation zwischen Nutzern und Betreibern als wichtiger Aspekt in der Begleitung der Betriebsphasen anerkannt wird, um Enttäuschungen und damit die Ablehnung der Maßnahmen zu verhindern. Folglich sollte die Betriebsoptimierung möglichst folgende Maßnahmen beinhalten:

- Nutzerworkshops zur Vermittlung der Veränderungen infolge einer Sanierung und deren Möglichkeit zur individuellen Einstellung des komfortablen Raumklimas,
- Entwicklung eines theoretischen Gebäudemodells (Simulationsmodell); unter Umständen sind repräsentative und kritische Zonen ausreichend zum Testen potenzieller Regelungsstrategien,
- Sukzessive Erprobung der Regelstrategie im Betrieb und Reflektion mit raumklimatischen Begebenheiten sowie Nutzerfeedback. Besondere Vorsicht ist bei Maßnahmen mit Einfluss auf den Nutzer oder dessen Wahrnehmung geboten.

Literatur:

- [1] Feist, W., PHPP Passivhaus-Projektierungspaket Version 9, Passivhaus Institut, Darmstadt, 2015
- [2] Alsmo, T., Alsmo, C., Ventilation and Relative Humidity in Swedish Buildings. JEP 05 (11) (2014), 1022–1036
- [3] Bundesgesundheitsblatt, Gesundheitliche Bewertung von Kohlendioxid in der Innenraumluft. Mitteilungen der Ad-hoc-Arbeitsgruppe Innenraumrichtwerte der Innenraumlufthygiene Kommission des Umweltbundesamtes und der Obersten Landesgesundheitsbehörden, Bundesgesundheitsblatt, Gesundheitsforschung, Gesundheitsschutz 51, (2008), 1358–1369

Kontakt:

Technische Hochschule Ostwestfalen Lippe
Futur Energy – Institut für Energieforschung

Prof. Dr.-Ing. Susanne Schwickert
susanne.schwickert@th-owl.de

Oliver Glahn, M.Eng.

5.7 degewo ZKH: Klimagerechte Sanierung eines MFH | Betriebsergebnisse

5.7.1 Einleitung

In Deutschland verursachen private Haushalte etwa ein Viertel des gesamten Endenergieverbrauchs [1]. Der Wohngebäudesektor ist daher einer der wichtigsten Säulen für das Klimaszenario 2050 und damit für das Gelingen der Energiewende. Dazu soll der Endenergieverbrauch um etwa 85 % gesenkt und nahezu klimaneutral gedeckt werden.

Als größte landeseigene Berliner Wohnungsgesellschaft hat die degewo AG mit dem „Zukunftshaus“ (ZKH) (Abb. 5.7-1a und b) ein Modellprojekt realisiert, welches Wege aufzeigt, wie anstehende Sanierungen von Bestandsgebäuden mit einem höchstmöglichen Grad an energetischer Nachhaltigkeit geschehen



Abb. 5.7-1a: Ansicht des degewo Zukunftshauses vor der Sanierung [degewo]

können. Begleitet wird dieser Prozess von der Hochschule für Technik und Wirtschaft (HTW) Berlin. Gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie hat die HTW Berlin die Performance des Gebäudes bewertet und den Betrieb optimiert.



Abb. 5.7-1b: Ansicht des degewo Zukunftshauses nach der Sanierung [HTW Berlin]

5.7.2 Das degewo Zukunftshaus

Bei dem Objekt handelt es sich um ein im Jahr 1954 erbautes Mehrfamilienhaus mit 64 Wohnungen auf acht Stockwerken und einer Wohnfläche von insgesamt 3.727 m². Das Sanierungskonzept zeichnet sich durch maximale Energieeffizienz der Gebäudehülle und Anlagentechnik sowie weitgehende lokale Erzeugung, Nutzung und Speicherung von Strom und Wärme aus. Der sehr gute Wärmeschutz der Gebäudehülle und ein dezentrales maschinelles Lüftungssystem mit Wärmerückgewinnung führen zu einem prognostizierten Heizwärmebedarf auf Passivhausstandard.

Die Wärmeversorgung basiert auf einem saisonalen Niedertemperatur(NT)-Erdreichspeicher und einem intelligenten Wärmemanagement. Der NT-Erdreichspeicher mit einem Nettovolumen von ca. 850 m³ ist flach neben dem Gebäude angeordnet (1,2 m tief) sowie seitlich und nach oben hin gedämmt. Er bildet die Wärmequelle für zwei Wärmepumpen zur Bereitstellung von Heizwärme und Trinkwarmwasser. Der Einsatz einer Deckenflächenheizung ermöglicht niedrige Heizungs-Vorlauftemperaturen und damit hohe Jahresarbeitszahlen der Heizungs-Wärmepumpe. Nebeneffekt der Deckenheizung ist die sommerliche Komfortsteigerung durch eine quasi kostenlose Kühlung über das System bei gleichzeitiger Beladung des NT-Speichers.

Auf dem Dach sind photovoltaisch-thermische Hybridmodule (PVT) installiert (121 St., 31,5 kW_{p,el}, 87 W_{p,th}), die Sonnenenergie auf einer Fläche sowohl in Strom als auch Wärme umwandeln. Zusätzlich sind Photovoltaik-Module (PV) an der nach SO weisenden Giebelfassade (19,8 kW_p) und auf einem Teil des Daches installiert (48,6 kW_p). Überschüssiger Strom wird in einem Redox-Flow-Batteriespeicher (70 kWh) gespeichert und über ein Mieterstrommodell an die Bewohner vermarktet. Die Sanierungsmaßnahmen wurden im Juni 2017 abgeschlossen [2].

5.7.3 Monitoringergebnisse und Betriebsoptimierung

Die energetischen Ziele von effizienten Gebäuden mit niedrigen Energiebedarfswerten werden in der Praxis häufig verfehlt. Eine wesentliche Ursache

hierfür ist der immer größer werdende relative Einfluss von Unsicherheiten auf die prognostizierten Energiebedarfskennwerte mit steigender Energieeffizienz der Gebäude.

5.7.3.1 Energieverbrauch für Heizung und Trinkwarmwasser

Dies zeigt sich auch im Betrieb des degewo ZKH. Der Energieverbrauch für die Bereitstellung von Warmwasser ist mit ca. 28 kWh/(m²_{NRF} *a) etwa doppelt so hoch wie prognostiziert. Eine wesentliche Ursache hierfür ist eine unzureichende Berücksichtigung der Zirkulationsverluste. Gegenüber der Prognose hat sich die Länge der Zirkulationsleitungen verdoppelt, da bauliche Gegebenheiten zu separaten Strängen für Badezimmer und Küchen nach der Sanierung führten. Die Zirkulationsverluste verursachen etwa 40 % der ins Warmwassersystem zugeführten Wärmemenge.

Auch für das Heizsystem des Gebäudes ist im Vergleich zur Prognose ein erhöhter Verbrauch zu erkennen. Der witterungsbereinigte Heizenergieverbrauch liegt im Kalenderjahr 2018 bei 25 kWh/(m²_{NRF} *a) und sinkt im Folgejahr deutlich auf ca. 20 kWh/(m²_{NRF} *a). Der Rückgang lässt sich unterschiedlichen Maßnahmen zuordnen, die messtechnisch nicht getrennt voneinander quantifiziert werden können: Veränderte Fühlerpositionen für besseres Regelverhalten, Absenkung der Vorlauf-temperatur ohne Komfortverlust und wiederholte Mieterinformation zu energiesparendem Lüftungsverhalten. Die Abweichung ist mit +33% zum anvisierten Planungsziel relativ betrachtet hoch, beträgt

absolut jedoch lediglich $5 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{NRF}} \cdot \text{a})$ und liegt damit im Bereich des Nutzereinflusses. Die am häufigsten gemessene Raumlufttemperatur mit $23 \text{ }^\circ\text{C}$ liegt zwei Kelvin über der in der Prognoserechnung angesetzten. Zudem erfolgt i. d. R. keine bedarfsgerechte Bedienung der wohnungsweise installierten Lüftungsanlagen. Anstatt sie z. B. beim Kochen auf die mögliche höhere Stufe zu stellen, wird meist zusätzlich über die Fenster gelüftet.

5.7.3.2 Temperaturverlauf im NT-Erdreichspeicher

Die im Vergleich zur Prognose höheren Wärmelasten wirken sich auch auf den saisonalen Temperaturverlauf im Erdreichspeicher aus (siehe Abb. 5.7-2). Aufgrund der kontinuierlich hohen Last des

Warmwassersystems erfolgt bereits im September eine bilanzielle Entladung des Speichers. Mit Beginn der Heizperiode fallen die Speichertemperaturen rapide und erreichen bereits im Dezember den Gefrierpunkt. Mit steigenden Außenlufttemperaturen und solaren Einstrahlungen wird der Speicher ab April wieder regeneriert. In der Jahresbilanz wird dem Erdreichspeicher eine Energiemenge von etwa 80 MWh entnommen und zwischen 40 und 45 MWh zugeführt; die Differenz strömt über das umliegende Erdreich nach. Es zeigt sich, dass die Temperaturen neben dem Speicher fast im gesamten Jahr über der Speichertemperatur liegen, so dass die Dämmung kontraproduktiv eine weitere Regeneration über das umliegende Erdreich oder eindringendes Oberflächenwasser verhindert.

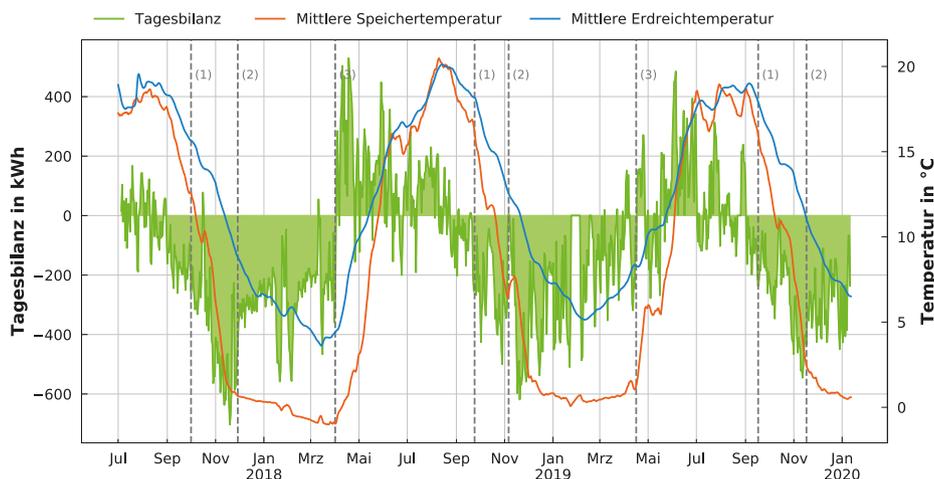


Abb. 5.7-2: Tagesbilanz für den Energieein- und -austrag des NT-Erdreichspeichers (positiv = Eintrag), die mittlere Speichertemperatur und die mittlere Erdreichtemperatur neben dem Speicher im Messzeitraum. Ereignisse: (1) Beginn der Heizperiode, (2) Nahwärme zugeschaltet, (3) Beginn Speicherbeladung

5.7.3.3 Betriebsoptimierung der PVT-Anlage

Die verfügbaren Energiemengen zur Beladung des Erdreichspeichers hängen wesentlich von den solarthermischen Erträgen der PVT-Anlage ab. Im ersten Betriebsjahr liegen diese ca. 40 % unterhalb der prognostizierten Werte (vgl. Abb. 5.7-3). Eine korrigierte Verrohrung der Kollektorverbände im Dezember 2017 bewirkte die signifikante Ertrags- und Leistungssteigerung ab 2018.

Einen wesentlichen Einfluss auf den Ertrag der PVT-Anlage haben die Betriebszeiten der Solar- kreispumpe und damit verbunden die implementierte Regelstrategie. In der Standard-Regelung

wird nicht berücksichtigt, dass die Temperatur im Erdreichspeicher großen saisonalen Schwankungen unterliegt. Ohne eine kontinuierliche Schwellwert- anpassung wird daher eine Regeneration oder eine direkte primärseitige Versorgung der Wärmepum- pen in Zeiten geringer solarer Einstrahlung oder in den Nachtstunden verhindert. Insbesondere wäh- rend der Heizperiode und bei niedrigen Tempera- turen im Erdreichspeicher können die PVT-Module verstärkt die Außenluft als Wärmequelle nutzen. Es wurde eine verbesserte Regelstrategie erarbeitet, welche u. a. die Temperaturdifferenz zwischen Wär- mequelle (Kollektortemperatur) und -senke (Wär- mepumpen und Erdreichspeicher) berücksichtigt.

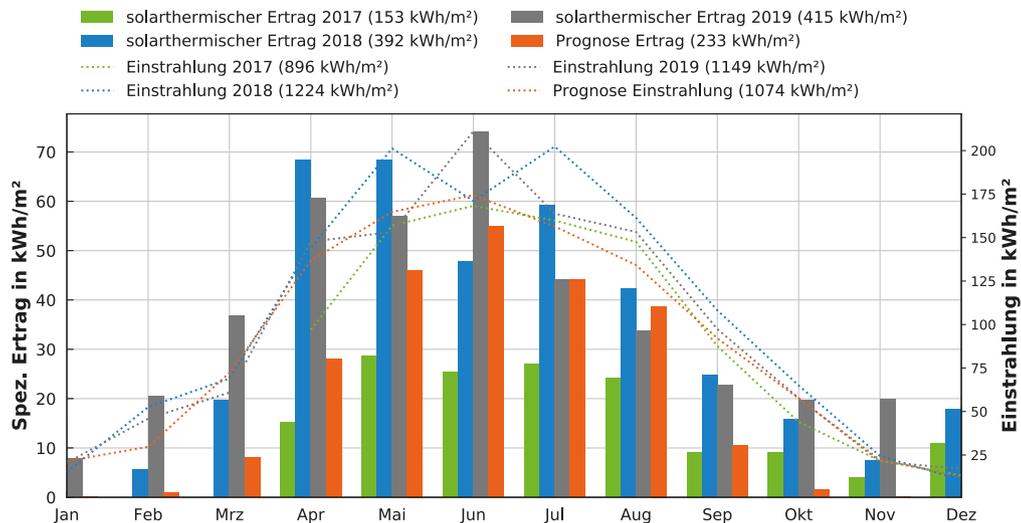


Abb. 5.7-3: Prognostizierte und gemessene spez. thermische Erträge der PVT-Anlage (Säulen) sowie solare Einstrahlung (Linien) auf Basis von Monatswerten. Die gesamte Aperturfläche der PVT-Anlage beträgt 189 m². Die Betriebsverbesserungen der PVT-Anlage, allerdings auch die niedrigen Temperaturen im Erdreichspeicher, führen zu einem Jahresertrag im Bereich von 74 MWh bis 78 MWh (Vergleich Prognose: 44 MWh).

Weitere Ertragssteigerungen konnten durch eine Anpassung der Frostschutzfunktion sowie Maßnahmen zur Steigerung der Volumenströme in den hydraulischen Kreisen für die Wärmeübergabe an die angeschlossenen Wärmesenken erzielt werden. Unabgedeckte PVT-Kollektoren sind auf Stromerzeugung optimiert, wodurch die thermische Anwendung auf niedrige Fluidtemperaturen beschränkt ist. Daher wird nahezu der gesamte thermische Ertrag zur Beladung des Erdreichspeichers oder primärseitigen Versorgung der Wärmepumpen verwendet. Eine direkte Nutzung zur Warmwasserbereitung (<1 %) oder Heizungsunterstützung (0 %) findet praktisch nicht statt.

5.7.3.4 Mieterstrommodell erzielt einen hohen Grad an Eigenversorgung

Die gelieferten Energiemengen des installierten PV-Batteriesystems werden für die Versorgung der Gebäudetechnik verwendet und von einem Partner aus der Energiewirtschaft über ein Mieterstrommodell direkt an die Bewohner geliefert. Und das mit großem Erfolg: 69 % der Mietparteien beziehen den hauseigenen Stromtarif.

In den Wintermonaten wird der erzeugte Solarstrom größtenteils direkt im Gebäude verbraucht und nur an sonnigen Tagen geringe Mengen zur Speicherbeladung verwendet (siehe Abb. 5.7-4). Die Folge sind lange Stillstandzeiten mit periodischem Netzbezug

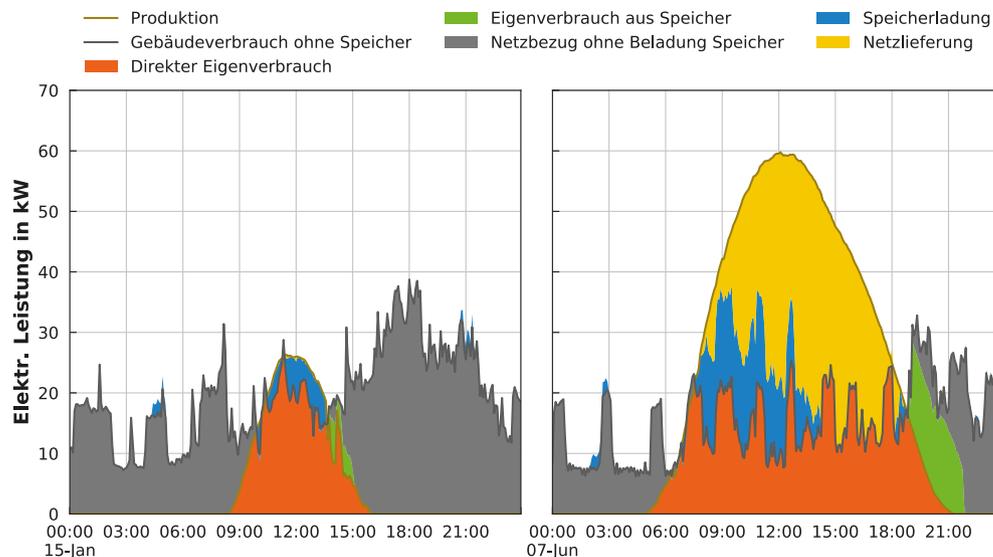


Abb. 5.7-4: Erzeugungs- und Lastprofil für einen ausgewählten Wintertag (15.01.2018) und einen Sommertag (07.06.2018) mit jeweils jahreszeitlich guten solaren Einstrahlungsbedingungen

zur Deckung der Standby-Verluste des Speichers. Im Sommer werden durch das PV-System große Energieüberschüsse erzielt, die ins öffentliche Stromnetz eingespeist werden. Die verfügbare Speicherkapazität deckt die Gebäudelast vorrangig in den Abendstunden. In der Jahressumme wird ein Deckungsgrad von etwa 30 % erreicht und es werden ca. 60 % der lokal erzeugten elektrischen Energie direkt im Gebäude verbraucht.

Der eingesetzte Redox-Flow-Batteriespeicher weist im Betrieb mit einem energetischen Jahresnutzungsgrad von nur 0,41 eine schlechte Gesamteffizienz auf. Aufgrund der großen Verluste während der Be- und Entladung sowie der hohen Standby-Last, liegt die AC-seitige nutzbare Entladeenergie mit ca. 37 kWh deutlich unter der Nennkapazität von 70 kWh. Simulationstechnische Untersuchungen

auf Basis der gemessenen Last- und Erzeugerdaten verdeutlichen, dass sowohl für einen energetischen als auch wirtschaftlichen Betrieb des Speichers eine signifikante Effizienzsteigerung notwendig ist.

5.7.3.5 Sanierungsmaßnahme erzielt hohe CO₂-Einsparung

Die Wärmeversorgung des degewo ZKH erfolgt strombasiert über ein Wärmepumpensystem. Aufgrund der niedrigen Temperaturen im Erdreichspeicher wird in den Wintermonaten die aus dem Bestand vorhandene Nahwärme zugeschaltet und versorgt vorrangig die Warmwasserbereitung. Systembedingt hat dieser Anteil einen um den Faktor der Arbeitszahl größere Wirkung auf die Endenergiebilanz. Dies verdeutlicht die jährliche Endenergiebilanz.

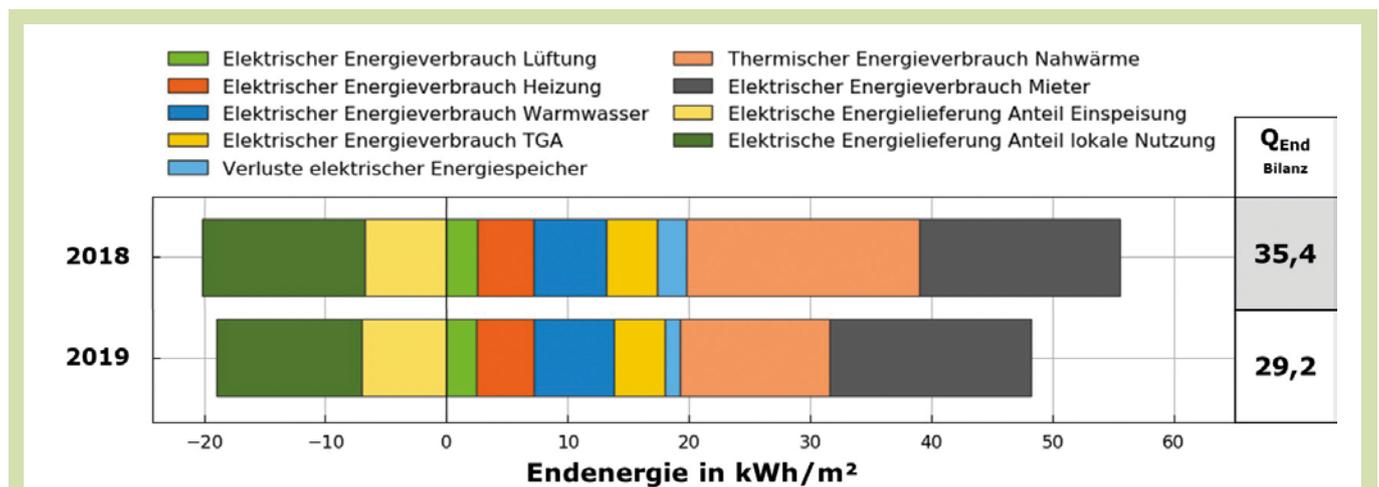


Abb. 5.7-5: Endenergetische Gesamtbilanz des degewo Zukunfthauses auf Basis von jährlichen Energiekennzahlen. Verbräuche sind positiv und Gutschriften negativ dargestellt. Der Anteil zur Bereitstellung der Heizenergie ist witterungsbereinigt. Energiebezugsfläche ist die Nettoraumfläche (4.392 m²).

giebilanz in Abb. 5.7-5. Obwohl im Kalenderjahr 2019 nur 26 % der benötigten Wärme über den Nahwärmeanschluss bereitgestellt wird, liegt der Anteil am Endenergieverbrauch über dem des Wärmepumpensystems. In der Summe wird der Endenergieverbrauch gegenüber dem Zustand vor der Sanierung um über 70 % reduziert und die Bilanz mit einem Energiebezug im Jahr 2019 von ca. 30 kWh/(m²a) um 85 % verbessert. Damit erfüllt das Gebäude schon heute die Klimaziele für 2050 und durch die Sanierungsmaßnahmen werden jährlich ca. 130 t CO₂ eingespart.

5.7.4 Fazit

Mit dem Zukunftshaus hat die degewo AG ein Modellprojekt für die Sanierung eines Geschosswohnungsbaus mit einer möglichst lokalen Erzeugung und Nutzung von Strom und Wärme realisiert. Das Nutzerverhalten unterliegt großen statistischen Schwankungen und kann insbesondere bei effizienten Energiekonzepten einen großen Einfluss auf die Endenergiebilanz haben. Diese, aber auch technische Unsicherheiten, sollten zukünftig in der Energiebilanzierung stärker berücksichtigt werden, um auch die Robustheit gegenüber Laständerungen und damit die Versorgungssicherheit des gewählten Energiekonzeptes bewerten zu können. Im degewo ZKH macht der im Vergleich zur Planung höhere Wärmeverbrauch und die damit verbunden niedrigen Temperaturen im Erdreichspeicher ein Zuschalten der aus dem Bestand vorhandenen Nahwärme notwendig.

Im urbanen Umfeld sind die Flächenpotentiale für die Energiegewinnung innerhalb der Grundstücksgrenzen oder des Quartiers stark begrenzt. Niedertemperaturkonzepte mit der Einbindung von PVT Kollektoren zur primärseitigen Versorgung eines Wärmepumpensystems und gleichzeitiger Kopplung mit einem Erdreichkollektor können eine effiziente Lösung darstellen. Allerdings zeigen die Messergebnisse, dass unter diesen Randbedingungen auf eine Dämmung des Erdreichkollektors verzichtet werden sollte, um das ganze Potential zur Nutzung der Umweltwärme zu nutzen.

Die Analyse der Daten und damit verbunden das Aufdecken (und Beheben) von Fehlern sowie das Erarbeiten und Umsetzen von Maßnahmen zur Effizienzsteigerung des Gebäudebetriebes in den ersten Betriebsjahren des degewo ZKH demonstrieren die Notwendigkeit eines technischen Gebäudemonitorings. Insbesondere komplexere Anlagen und innovative Versorgungskonzepte, die noch nicht in großer Breite erprobt und in der Praxis umgesetzt worden sind, erfordern eine kontinuierliche Analyse und Betriebsüberwachung der Systemkomponenten.

Literatur:

- [1] Umweltbundesamt (Hrsg.): Energieverbrauch nach Energieträgern, Sektoren und Anwendungen. Unter: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/energie/energieverbrauch-nach-energetraegern-sektoren>; abgerufen am 15.01.2019
- [2] Dietz, Sebastian; Werder, Frederik; Sick, Friedrich: Monitoring eines innovativ sanierten Zeilenhochhauses - Erfahrungen aus dem ersten Betriebsjahr. In: BauSIM 2018- 7. Deutsch-Österreichische IBSPA-Konferenz Tagungsband, S. 124-131, Karlsruhe, 2018

Kontakt:

Hochschule für Technik und Wirtschaft Berlin
FB1, Regenerative Energiesysteme

Prof. Dr.-Ing. Friedrich Sick
friedrich.sick@htw-berlin.de

Sebastian Dietz, M.Sc.
sebastian.dietz@htw-berlin.de

5.8 Forschungsprojekt „Big Data für EnBop“

5.8.1 Einleitung

5.8.1.1 Hintergrund und Problemstellung

Gebäude und Anlagen werden heute zunehmend komplexer. Die Vernetzung im Zeitalter des Internet-of-Things (IoT) nimmt stetig zu [1] und die Anforderungen an Energieeffizienz und Nutzerkomfort steigen auch weiterhin [2]. Aktuell verursachen Gebäude mit ihren technischen Anlagen ca. 35 % des Endenergieverbrauchs in Deutschland [3]. Bis zum Jahr 2050 soll ein nahezu klimaneutraler Gebäudebestand erreicht werden, indem der nicht erneuerbare Anteil des Primärenergiebedarfs für die Raumkonditionierung gegenüber dem Referenzjahr 2008 um 80 % gesenkt wird [4]. Zum Erreichen dieses Ziels sind neben der Umstrukturierung von Wärme, Kälte und Strom auf erneuerbare Energieträger weitere erhebliche Maßnahmen zur Schaffung von Effizienz notwendig. In diesem Zusammenhang diskutieren unterschiedlichste Forschungsansätze den energetischen Mehrverbrauch durch nicht-optimal betriebene Anlagentechnik. Etabliert hat sich die Beschreibung des Performance Gaps, also der Abweichung zwischen eigentlich erzielbarem Soll und dem tatsächlich auftretenden Ist.

Moderne Nichtwohngebäude verfügen heute oft über eine Gebäudeleittechnik bzw. Managementbedienebene, die Sensor- und Aktordaten kontinuierlich erfasst [5]. Diese Daten spiegeln den Betrieb des Gebäudes wider. Sie geben Aufschluss über die Funktionsweise des Gebäudes als Gesamtes, aber

auch über einzelne Anlagen und Gewerke. Diese Daten fallen heute im Gebäudebetrieb massenhaft an, jedoch mangelt es an Strategien, diese automatisiert zu bewältigen und insbesondere die Datenmenge bzw. Vielfalt der Daten („Big Data“) stellen hohe Anforderungen an eine nachgelagerte Auswertung über größere Betriebszeiträume.

Im Sinne einer umfassenden energetischen und funktionstechnischen Überprüfung der technischen Anlagen, werden größere Zeiträume ausgewertet und viele der vorhandenen Messkanäle miteinander kombiniert. Dabei werden schnell Datenmengen erreicht, für die klassische Auswerteverfahren und konventionelle Infrastrukturen an Ihre Grenzen kommen.

5.8.1.2 Motivation und Aufgabenstellung

Die heutigen Daten einer Leittechnik können Messwerte von Sensoren und Aktoren, z. B. Temperaturen, Volumenströme, Drücke oder Ventilstellungen, in unterschiedlichen zeitlichen Auflösungen (häufig sekundlich, minütlich, viertelstündlich etc.) erfassen und speichern. Fehlermeldungen von Steuergeräten, Aktoren, wie z. B. Pumpen und ähnliches, werden ebenfalls aufgezeichnet. Die bereits heute große Datenmenge wird sich in Zukunft weiter erhöhen und verdichten.

Eine ganzheitliche Betrachtung dieser Daten mit einem hohen Automationsgrad kann aber nur erfolgen, wenn genügend Kontextinformationen zur Verfügung stehen. Allgemeine Attribute wie zum Beispiel die physikalische Gebäudestruktur, Gebäudestandort, Nutzungszweck, aber auch detaillierte

und zum Teil subjektive Merkmale wie zum Beispiel der individuelle Nutzerkomfort oder die technische Auslegung einzelner Anlagen und deren teils heterogene Regelungsstrategien erschweren eine allgemeingültige Aussage über die Performance eines Gebäudes.

Für die Analyse von Betriebs- und Automationsdaten eignen sich Big Data Technologien bzw. Methoden der künstlichen Intelligenz. Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wird daher ein algorithmischer Big Data Baukasten als informationstechnologischer Rahmenwert entwickelt, mit dessen Hilfe sich verschiedene Fragestellungen rund um die Analyse von Betriebsdaten effizient beantworten lassen. Um Prozesse überhaupt handhabbar zu gestalten, wurde dieser Baukasten nach einem „Teile-und-herrsche-Prinzip“ aufgebaut. Für die Umsetzung wurden sowohl reale Betriebsdaten, die über die Gebäudeautomation von zwei großen Nicht-Wohngebäuden gewonnen wurden, als auch mittels dynamischer Gebäudesimulationsmodelle synthetisch erzeugte Betriebsdaten verwendet. Die Anwendung des Big Data Baukastens wurde im Rahmen der Forschungsarbeit in zahlreichen Experimenten aus den Bereichen Datenaufbereitung, Datenklassifikation, Merkmalanalyse und Fehlererkennung in gebäudetechnischen Anlagen demonstriert.

Das Ziel dieses Forschungsvorhabens ist somit die Entwicklung von skalierbaren und automatisierten Lösungen zur Unterstützung der Minimierung von Performance Gaps, die durch diverse Mängel während der Planung, Errichtung und dem Betrieb von Gebäuden entstehen können. Dadurch soll bestmöglicher Nutzerkomfort bei gleichzeitig hoher

Energieeffizienz gewährleistet und zur energetischen Betriebsoptimierung des Gebäudebestandes beigetragen werden.

5.8.2 Praktischer Teil

5.8.2.1 Methodik und konzeptioneller Aufbau des Big Data Baukastens

Im Rahmen des Forschungsprojektes werden zahlreiche Algorithmen evaluiert, an Beispielen zur Anwendung gebracht und auch selbst entwickelt. Hierbei wurde schnell deutlich, dass sich Gebäude- und Anlagenanalysen nicht als einzelner komplexer Algorithmus realisieren lassen, sondern vielmehr eine Vielzahl unterschiedlicher Verfahren zu einem sinnvollen Zusammenspiel orchestriert werden müssen. Der Big Data Baukasten soll als methodisches Rahmenwerk dienen, um die Wiederverwendbarkeit einzelner algorithmischer Bausteine per Konstruktion zu gewährleisten.

Als Lösungsansatz für die zuvor entwickelten Problemstellungen wurde im Rahmen dieses Forschungsprojektes der so genannte Big Data Baukasten entwickelt [6]. Dieser fokussiert auf die Implementierung algorithmischer Fragestellungen zur automatisierten Wissenserkennung und Herleitung gebäude- und anlagenspezifischer Merkmale und wurde als Demonstrator umgesetzt. Die grundlegende Idee dieses Konzeptes ist die strukturierte Entwicklung einzelner algorithmischer Bausteine, die sich zu komplexen Anwendungsszenarien zusammensetzen und orchestrieren lassen. Der Big Data Baukasten gliedert sich zur besseren Übersicht

in mehrere algorithmische Kategorien, die jeweils zugehörige Themengebiete adressieren: Datenanbindung, Vorverarbeitung, Analysen, Bewertung und Reporting.

5.8.2.2 Anwendungsbeispiele des Big Data Baukastens

In diesem Abschnitt werden vier typische Anwendungsbeispiele des Big Data Baukastens im Gebäude- und Anlagenkontext vorgestellt. Hierbei liegt der Fokus auf typischen Problemstellungen des Gebäude- und Anlagenbetriebs und dem allgemeinen Vorgehen zur Lösung ebendieser. Die gewählten Anwendungsbeispiele dienen hierbei dem besseren Verständnis der Problemdomäne und sollen Möglichkeiten für automatisierte Big Data Analysen aufzeigen. Die nachfolgenden vier Anwendungsbeispiele basieren auf ausgewählten Experimenten, die im Rahmen des Forschungsvorhabens durchgeführt wurden, und stellen einen Querschnitt der insgesamt betrachteten Themen und Experimente dar.

Anwendungsbeispiel 1: Datenaufbereitung

Ein grundsätzliches Problem, das oft im Feld auftritt, ist die Tatsache, dass Daten, die aus Zählern stammen, häufig nicht den Charakteristika entsprechen, die ein korrekt funktionierender Zähler hat (z. B. stetige Steigung, technisch nicht plausible Sprünge, Korrektur von Zählerrücksetzungen, Zähleraustausch usw.). Somit ist es notwendig, eine Korrektur der Rohdaten vorzunehmen und die Zählerdaten in eine einheitliche kumulierende Darstellung zu überführen. Im Rahmen des Big Data Baukastens findet dies-

bezüglich eine ganze Klasse von Verfahren Anwendung. Zu den eingesetzten Verfahren zählen beispielsweise auch die zeitliche und wertemäßige Interpolation von Messwerten zur Eliminierung von Messfehlern oder die Umrechnung von ereignisbasierten Daten (Change-of-Value) in äquidistante und damit vergleichbare Zeitreihen. Je nach Anwendungszweck kann außerdem die Eliminierung von Ausreißern oder die Umrechnung oder Normalisierung von Skalen sinnvoll sein.

Anwendungsbeispiel 2: Klassifikation und semantische Anreicherung unbekannter Daten

In diesem Kontext können mehrere Verfahren eingesetzt werden, wie z. B. die Klassifikation mit Entscheidungsbäumen oder durch Deep Learning sowie die Analyse des Anlagenkennzeichnungssystems (AKS). Der AKS bietet die Möglichkeit, semantische Informationen für Datenpunkte durch Analyse von Datenpunktnamen zu ermitteln. Typischerweise beschreibt der AKS einen konkreten Datenpunkt eindeutig (innerhalb eines Namensraums, z. B. einer Gebäudeleittechnik) und ist aus mehreren Teilen zusammengesetzt, die jeweils eine bestimmte Information transportieren.

Das allgemeine Vorgehen ist beispielhaft in Abb. 5.8-1 skizziert. In einem ersten Schritt wird der AKS (Geb23_Hzg1_HKSüd_VL_Temp) dahingehend geprüft, ob der Datenpunktnamen generell der Struktur des erwarteten Kennzeichnungssystems entspricht (z. B. Verwendung des korrekten Trennzeichens, Länge des Schlüssels usw.). Wenn der Algorithmus zum Ergebnis kommt, dass die grundlegende Struktur des Namens nicht korrekt ist, ergibt

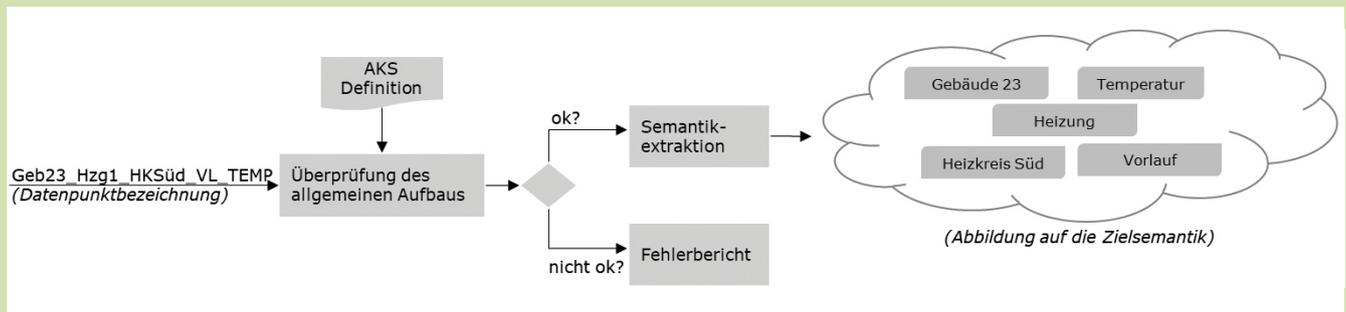


Abb. 5.8-1: Ablauf einer AKS-Analyse

eine weitere Analyse wenig Sinn, weswegen dies an die Aufrufenden rückgemeldet wird. Bei korrektem Aufbau kann mit der Semantikanalyse fortgefahren werden. Diese basiert in der Regel auf dem Abgleich eines vorher festgelegten Schemas, wie das AKS aufgebaut sein muss, und der tatsächlich vorliegenden Datenpunktbezeichnung.

Anwendungsbeispiel 3: Merkmalsidentifikation am Beispiel eines Heizkreises

Das dritte Anwendungsbeispiel soll veranschaulichen, wie mit Hilfe des Big Data Baukastens typische Merkmale technischer Anlagen und Systeme hergeleitet bzw. aus den Rohdaten isoliert werden können. In diesem Zusammenhang wird unter Merkmalen z. B. die Bestimmung der Anlagenaktivität, die Herleitung eines Aktivitätsprofils, die automatisierte Erkennung von Aktivitätsänderungen oder die Herleitung einer Kennlinie für den Heizungsbetrieb verstanden. An dieser Stelle werden exemplarisch die Merkmale des Aktivitätsprofils und der Heizkennlinie erläutert.

Für die Bewertung, ob und wann eine Heizung aktiv war, wurde im Big Data Baukasten ein entsprechender Algorithmus implementiert, der den gesamten Betrachtungszeitraum in so genannte Normwochen (Montag 0 Uhr bis Sonntag 24 Uhr) unterteilt und die jeweiligen Wochenabschnitte aufsummiert. In Abb. 5.8-2 ist dargestellt, wie die zuvor bestimmte Anlagenaktivität in Wochenabschnitte zerteilt

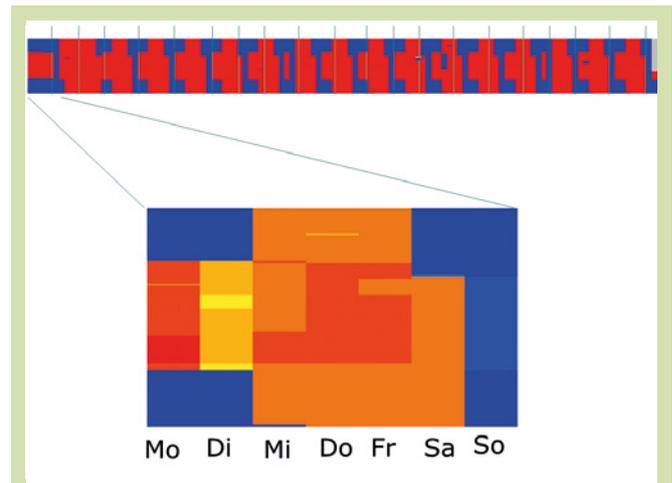


Abb. 5.8-2: Zerlegung in Wochenabschnitte und Aufsummierung zur Normwoche

wird und die jeweiligen Aktivitäten als Normwoche überlagert werden. Je gleichmäßiger die Färbung, desto konsistenter war die Aktivität über die Zeit. Blautöne stehen hierbei für niedrige Aktivität und die Gelbtöne für hohe Aktivität. Die Y-Achse stellt die Uhrzeiten von 0 bis 24 Uhr dar. Am Beispiel ist zu erkennen, dass montags und dienstags früh und spät wenig Aktivität vorlag, jedoch von Mittwoch bis Samstagabend die Anlage weitestgehend durchlief sowie sonntags überwiegend inaktiv war.

Bei der Kennliniendetektion soll diese zunächst anhand der Messdaten des Anlagenbetriebs automatisiert hergeleitet werden, um anschließend eine Validation der Kennlinie, also das Maß der Einhaltung, zu bestimmen. Zunächst werden die Rohdaten als

zweidimensionale Punktwolke, auf der X-Achse die Außentemperatur und auf der Y-Achse die Vorlauf-temperatur im Heizkreis, aufgetragen. Anschließend wird die Punktwolke mit eingeschränktem Wertebereich (Heizgrenztemperatur) und somit einen für den Heizbetrieb repräsentativen Ausschnitt dargestellt. Abb. 5.8-3 zeigt die finale Herleitung einer Regressionsgeraden durch den Algorithmus und die somit ermittelte Heizkennlinie. Im gewählten Beispiel wurde eine Steigung von $-0,4933$ berechnet und die tatsächliche Kennlinie wurde Gebäudeseitig mit der Steigung $-0,5$ betrieben. Auf diese Weise lässt sich mit minimaler Abweichung eine Kennlinie aus den Messwerten herleiten und qualitativ bewerten (hier z. B. Auslegung als Flächenheizung).

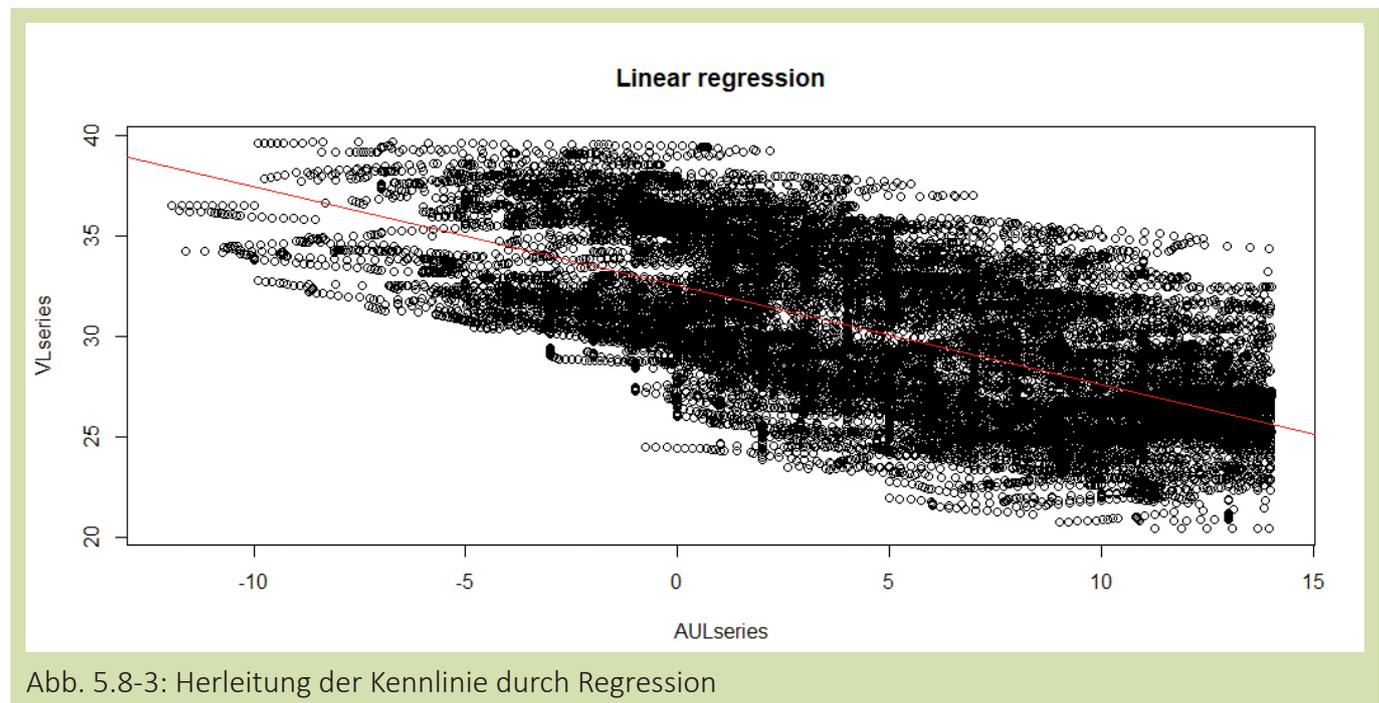


Abb. 5.8-3: Herleitung der Kennlinie durch Regression

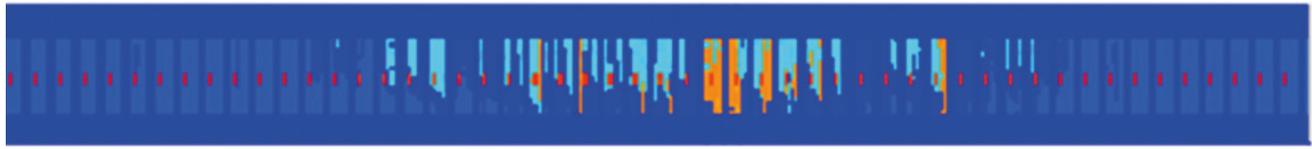


Abb. 5.8-4: Aggregiertes Aktivitätsprofil einer RLT-Anlage

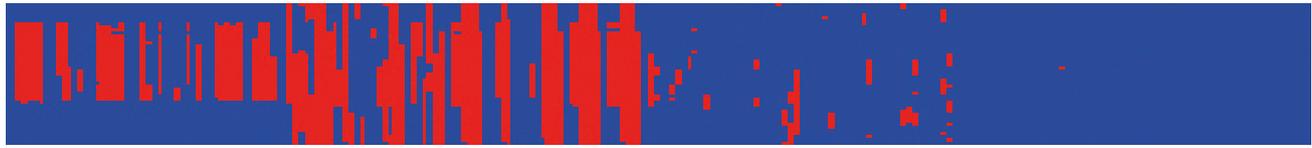


Abb. 5.8-5: Fehlererkennung mit Maschinellem Lernen (Probe mit Realdaten)

Anwendungsbeispiel 4: Automatisierte Fehlererkennung am Beispiel einer RLT-Anlage

Im vierten Anwendungsbeispiel sollen exemplarische Verfahren zur automatisierten Fehlererkennung am Beispiel einer Lüftungsanlage demonstriert werden. In diesem Zusammenhang wird in drei Verfahrensschritten vorgegangen: Dekomposition der Anlage, Definition von Betriebszuständen und Fehlerdefinition, Fehlererkennung.

Raumlufttechnische (RLT) Anlagen bestehen aus unterschiedlichen Sub-Komponenten, zum Beispiel einem Luftvorerhitzer (VE), Luftkühler (KUE), Luftnacherhitzer (NE), Wärmerückgewinnung (WRG) und Ventilatoren (Vent). Für eine möglichst allgemeingültige Betrachtung von RLT-Anlagen ist es sinnvoll, diese zunächst in ihre Sub-Komponenten zu dekomponieren. Dies hat den Zweck, die Komplexität einer Bewertung der Gesamtanlage gemäß dem „Teile-und-herrsche-Prinzip“ in mehrere kleinere Teilprobleme zu zerlegen und diese zunächst

im Einzelnen zu lösen. Durch den Prozess zur Dekomposition sollen abstrakte Anlagen, zunächst nur als Black Box (also ohne Wissen über die innere Struktur) betrachtet werden können.

Im nächsten Verfahrensschritt erfolgt für die Definition von Betriebszuständen und Fehlerdefinition eine zustandsbasierte Analyse dieser Komponenten, welche die Basis für eine algorithmische Fehlererkennung darstellt. Der Systemzustand erfolgt aus der Verkettung einzelner Betriebsmodi auf dieser Komponentenebene. Dabei sind alle möglichen Konstellationen, wie eine RLT-Anlage aufgebaut sein kann, zusammengefasst. Die Gesamtaufstellung der Zustandsmatrix stellt ein sogenanntes „150 %-Modell“ für Vollklimaanlagen dar. Aus den einzelnen Komponentenaktivitäten lässt sich eine Anlagenaktivität herleiten, wie beispielhaft in Abb. 5.8-4 dargestellt und mit unterschiedlichen Farben visualisiert ist.

Für den dritten Verfahrensschritt zur Fehlererken-

nung wurde ein Algorithmus mit Simulationsdaten trainiert, um diesen anschließend auf die Realdaten als Test anzuwenden. Die Übertragung auf Datensätze eines realen Nicht-Wohngebäudes zeigt beispielsweise folgenden Sachverhalt, wie er in Abb. 5.8-5 dargestellt ist. Hier ist zu sehen, dass der identifizierte Betriebsfehler „Gleichzeitiges Heizen und Kühlen“ im gewählten Beispiel sehr häufig auftritt. Um zu validieren, ob es sich tatsächlich um Fehler und nicht um gewünschtes Sollverhalten handelt, wurden im Rahmen der Verfahrensvalidierung die trainierten Daten mit den Realdaten verglichen. Als Fehlerursache konnte ein defektes Kühlerventil für die Probleme und Unregelmäßigkeiten im Gebäudebetrieb identifiziert werden.

5.8.3 Schlussfolgerung

Das Ziel dieses Forschungsvorhabens ist die Entwicklung von skalierbaren und automatisierten Lösungen zur Minimierung von Performance Gaps, die durch diverse Mängel während der Planung, Errichtung und dem Betrieb von Gebäuden entstehen können. Betriebsdaten, die mittels der Gebäudeautomation abrufbar sind, enthalten einen umfangreichen Informationsgehalt, um Probleme in der Betriebsführung von Gebäuden und Anlagen zu identifizieren.

Für die Analyse von Automations- und Betriebsdaten eignen sich Big Data Technologien. Diese zu etablieren stellt jedoch einen erheblichen initialen Aufwand dar. Im Rahmen des Forschungsprojektes wurde daher ein algorithmischer Big Data Baukasten als methodisches informationstechnologisches

Rahmenwerk entwickelt, mit dessen Hilfe sich verschiedene Fragestellungen rund um die Analyse von Betriebsdaten effizient beantworten lassen. Um Prozesse überhaupt handhabbar zu gestalten wurde dieser Baukasten nach dem „Teile-und-herrsche-Prinzip“ sowohl unter Verwendung realer Automationsdaten als auch synthetischer Betriebsdaten mittels Gebäude- und Anlagensimulationen entwickelt. Durch das algorithmische Rahmenwerk lassen sich einerseits individuelle Lösungen umsetzen, die sich durch Modularität, Wiederverwendbarkeit und Kombinierbarkeit auszeichnen. Andererseits ist es auch möglich komplexe Analyseszenarien umzusetzen und zu beherrschen. Die Elemente des Baukastens fokussieren dabei auf Datenkonnektivität, Datenaufbereitung und Vorverarbeitung sowie Datenanalyse und Ergebnisbewertung. Durch die Anwendung des Baukastens wurde eine skalierbare und auf viele Situationen der Qualitätssicherung zugeschnittene Methodik entwickelt. Damit konnten in den Untersuchungsobjekten zahlreiche Betriebsfehler gebäudetechnischer Anlagen identifiziert und Potentiale zur Verbesserung der Gebäudeperformance ausfindig gemacht werden. Zukünftig wird das entwickelte Verfahren zur Minimierung von Performance Gaps und zur energetischen Betriebsoptimierung des Gebäudebestandes beitragen.

Literatur:

- [1] J. Mauerer et. al. Studie Internet of Things 2019. IDG Business Media GmbH, 2018.
- [2] Waide, Paul; Ure, Jim; Smith, Graham; Nordass, Bill. The scope for energy and CO₂, savings in the EU through the use of building automation, 2014
- [3] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. Energieeffizienzstrategie Gebäude: Wege zu einem nahezu klimaneutralen Gebäudebestand. 2015. Webseite <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/energieeffizienzstrategie-gebaeude.html>.
- [4] Umweltbundesamt. Klimaneutraler Gebäudebestand 2050: Energieeffizienzpotenziale und die Auswirkungen des Klimawandels auf den Gebäudebestand. FKZ 3713 49 101/3716 41 110, Nov. 2017. Webseite <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/klimaneutraler-gebaeudebestand-2050-0>.
- [5] B. Müller, O. Zeidler, M. Geier, A. Badura, W. Müller et. al. Leitfaden zur Gebäudeautomation in öffentlichen Gebäuden zur energetischen Optimierung und Effizienzsteigerung gebäudetechnischer Anlagen. Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Wohnen, 2018.
- [6] J. Mehnert, D. Reiß, S. Plesser, M. Hannen: An algorithmic module toolkit to support quality management for building performance. In: E3S Web Conf. 111, S. 5002, 2019.

Kontakt:

Technische Universität München
Lehrstuhl für Gebäudetechnologie und
klimagerechtes Bauen

Lukas Lauss, M.Sc.
lukas.lauss@tum.de

Dipl.-Ing. Martin Heißler
martin.heissler@tum.de

Prof. Dipl.-Ing. Thomas Auer
thomas.auer@tum.de

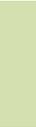
Steinbeis-Innovationszentrum energie+
an der Technischen Universität Braunschweig

Jan Mehnert, M.Sc.
j.mehnert@tu-braunschweig.de

Dr. rer. nat. Dirk Reiß

RWTH Aachen
Lehrstuhl für Software Engineering

Sebastian Stüber, M.Sc.
stueber@se-rwth.de





06

QUARTIERE

QUARTIERE

6.1 Quartierslösungen – komplexe Konzepte mit großem Potenzial

6.2 Quartiersprojekte in der Forschungsinitiative Energiewendebauen

6.3 Vision 2020: kommunale netzgebundene Energieversorgung in Wüstenrot

6.4 Energieoptimiertes Quartier Margarethenhöhe Essen (EnQM)



Im ersten Teil des Kapitels wird ausgehend von den politischen Rahmenbedingungen der Ansatz der energetischen Quartiersplanung erläutert und wesentliche Schritte zur Erstellung von Energiekonzepten für Quartiere aufgezeigt. Der zweite Teil des Kapitels gibt einen Überblick über die Quartiersprojekte in der Forschungsinitiative Energiewendebauen. Neben der thematischen Ausrichtung der Projekte wird ein Fokus auf die betrachteten Quartiere in den Förderprojekten gelegt. Dafür wurden unter anderem Auswertungen erstellt, die für die ausgewerteten Quartiere der Förderprojekte zeigen, in welchen Siedlungstypen welche Energieversorgung betrachtet wird.

6.1 Quartierslösungen – komplexe Konzepte mit großem Potenzial

6.1.1 Internationale und nationale CO₂-Reduktionsziele mit Fokus auf Gebäude und Quartiere

Das Ziel, den fortschreitenden Klimawandel zu stoppen und die Erderwärmung auf deutlich unter 2 °C bzw. auf maximal 1,5 °C über dem vorindustriellen Niveau zu begrenzen, erfordert unter anderem eine weltweite Transformation der Energiesysteme auf allen Ebenen. Um das 1,5-Grad-Ziel zu erreichen, müssen die CO₂-Emissionen schrittweise bis auf netto null reduziert werden, wobei für diesen Prozess ein zeitlich begrenzter Korridor bis zum Jahr 2050 zur Verfügung steht [1], [2].

Betrachtet man die Verteilung des weltweiten Gesamtenergieverbrauchs, wird die Bedeutung von Städten für das Erreichen der Klimaschutzziele ersichtlich: weltweit fallen hier etwa 60 bis 80 % des Gesamtenergieverbrauchs an. Zu erwarten ist zudem, dass dieser Anteil zukünftig mit der Zunahme der Weltbevölkerung und dem weiteren Wachstum von Städten weiter steigen wird [3].

Im Kontext der weltweiten CO₂-Reduktionsziele hat die EU für die Jahre 2020 und 2030 CO₂-Reduktionsziele von 20 % und 40 % gegenüber dem Jahr 1990 festgelegt. Für das Jahr 2050 ist die Klimaneutralität der gesamten EU das Ziel [5].

Der Blick auf die Ebene der EU (EU-28) zeigt weiterhin die Bedeutung des Gebäudesektors, der für etwa 40 % des Endenergieverbrauchs und 36 % der gesamten CO₂-Emissionen der EU verantwortlich ist. Zur Verminderung der CO₂-Emissionen im Ge-

bäudesektor verfolgt die EU das Ziel, die Energieeffizienz des Gebäudebestands zu verbessern, sowie den Anteil an Energie aus erneuerbaren Quellen zu steigern. Maßgeblich soll dies durch die Europäische Gebäuderichtlinie (EPDB) befördert werden. Die weitere Ausgestaltung der Gebäuderichtlinie erfolgt auf nationaler Ebene der Mitgliedsstaaten [6]. Die Betrachtung der nationalen Ebene zeigt, dass in Deutschland 35 % des Endenergieverbrauchs auf den Gebäudesektor entfallen [7], ein Anteil von 90 % davon wird für die Bereitstellung von Wärme aufgewendet [8]. Weiterhin entstehen 40 % der gesamtdeutschen CO₂-Emissionen in diesem Bereich [9]. In Anlehnung an die Ziele der EU verfolgt die Bundesregierung das Ziel, bis zum Jahr 2050 den Treibhausgasausstoß im Vergleich zum Jahr 1990 um 80 bis 95 % zu reduzieren. Zugleich soll der Primärenergieverbrauch im gleichen Zeitraum im Vergleich zu 2008 um 50 % reduziert werden. Die Ziele für den Gebäudesektor umfassen eine Reduktion des Primärenergiebedarfs bis 2050 um ca. 80 %. Zudem soll der Wärmebedarf der Gebäude bis zum Jahr 2020 um 20 % verringert werden und die Sanierungsrate auf 2 % pro Jahr gesteigert werden. Langfristig wird bis zum Jahr 2050 ein nahezu klimaneutraler Gebäudebestand angestrebt, bei dem die Gebäude einen geringen Energiebedarf aufweisen, der zu großen Teilen durch regenerative Energien gedeckt wird [9]. Bislang wird in Deutschland jedoch nur eine Sanierungsrate von unter 1 % erreicht. Dies zeigt, dass die umgesetzten Einsparmaßnahmen und die bisherigen Anreize in Deutschland nicht ausreichen, um die gesteckten Ziele zu erreichen [10].

6.1.2 Nicht nur Gebäudeeffizienz: Bedeutung und Potenzial von Quartierskonzepten

Die Bedeutung des Quartiers für die Energiewende in Deutschland wird jedoch erst ersichtlich, wenn man neben den CO₂-Emissionen im Gebäudesektor die Sektoren Stromversorgung und Mobilität und die damit verbundenen Herausforderungen bis zum Jahr 2030 in den Blick nimmt. In den kommenden zehn Jahren erfordert der Klimaschutz eine Verdopplung der erneuerbaren Stromerzeugungskapazitäten bei gleichzeitiger Abschaltung eines relevanten Teils fossiler Großkraftwerke. Damit geht die Energiewende in eine zweite Phase, da nicht nur der Ausbau der erneuerbaren Stromerzeugung, sondern insbesondere ihre Integration in das Energiesystem neue Anforderungen an die Umsetzung der Energiewende stellt. Dezentrale Energiesysteme müssen in den kommenden Jahren nicht nur Großkraftwerke in ihrer bisherigen Funktion ersetzen und die Versorgungssicherheit gewährleisten, sondern zusätzlich die stark anwachsende Dynamik in den Stromnetzen ausgleichen, um Netz- und Versorgungsengpässe zu verhindern. Ein weiterer relevanter Faktor für die Bedeutung von Quartierslösungen ist die Transformation des Mobilitätssektors: hier müssen bis zum Jahr 2030 ebenfalls fossile Brennstoffe durch erneuerbare Energien ersetzt werden, zusätzlich ist es erforderlich, neue Mobilitätskonzepte zu entwickeln und vor allem umzusetzen, damit der Klimawandel in den kommenden zehn Jahren erfolgreich begrenzt werden kann. Und gerade in diesen Handlungsfeldern der Energiewende liegt die Stärke von integralen Quar-

tierskonzepten. Durch Kopplung der Strom- mit der Wärmeversorgung sowie mit Sanierungs- und Mobilitätskonzepten, haben Quartierslösungen ein enormes Potenzial im Hinblick auf die genannten Herausforderungen der Energiewende bis zum Jahr 2030. Durch die Sektorenkopplung können zudem Lösungsansätze im Quartier kombiniert und somit wirtschaftliche Synergien genutzt werden.

6.1.3 Forschung zu Gebäuden und Quartieren im 7. Energieforschungsprogramm

Für die Umsetzung der deutschen CO₂-Reduktionsziele im Gebäudesektor ist die Forschung im Bereich energieoptimierte Gebäude und Quartiere ein wichtiger Baustein. Im 7. Energieforschungsprogramm der Bundesregierung wurde daher ein technologiespezifischer Förderschwerpunkt auf diesen Forschungsbereich gelegt. Einerseits ist in diesem Kontext die Entwicklung von einzelnen Technologien erforderlich, andererseits gewinnt der systemische Ansatz für die Interaktion des Quartiers mit den weiteren Ebenen des Energiesystems sowie mit benachbarten Teilenergiesystemen zunehmend an Bedeutung. Durch die Verknüpfung der Sektoren Strom, Wärme und Mobilität sollen zukünftig auch Quartiere mit dem Stromsystem interagieren. Aufgrund der Komplexität von Quartierslösungen sind Demonstrationsprojekte im Quartiersbereich von besonderer Bedeutung: sie liefern zum einen wertvolle Erkenntnisse über die Wechselwirkung zwischen den Komponenten und zeigen Potenziale integraler Lösungsansätze auf, zum anderen zeigt der Praxistest, wie Quartierskonzepte geplant und

umgesetzt werden können. Dabei liefern die Untersuchung sozioökonomischer Themen wichtige Erkenntnisse [8].

6.1.4 Der Ansatz der energetischen Quartiersplanung

Damit die Ziele auf internationaler und nationaler Ebene zur Reduktion der CO₂-Emissionen im Gebäudebereich erreicht werden können, ist eine Beschleunigung der bisherigen Anstrengungen erforderlich. Die bisherigen Entwicklungen zeigen jedoch, dass die Betrachtung des Gebäudesektors allein nicht zur Zielerreichung führen wird, weswegen sich zusätzlich die Betrachtung des Quartiers als Gesamtsystem anbietet.

Quartiere werden in diesem Zusammenhang zu meist als ein zusammenhängendes Baugebiet verstanden, welches eine oder mehrere unterschiedliche Siedlungstypen aufweist und durch die Struktur der Siedlung bzw. durch deren Funktion zu benachbarten Baugebieten abgegrenzt werden kann. Quartiere können sowohl im Gebäudebestand als auch für den Neubau definiert werden [11].

Städte und damit Quartiere als deren Bestandteile weisen überwiegend hohe Energieverbrauchs dichten auf. Dies bietet, bei der derzeitigen Energieverbrauchsstruktur ein hohes Potential zur Reduzierung von Treibhausgasemissionen, das einerseits durch den Einsatz von erneuerbaren Energien zur Strom- und Wärmeerzeugung und andererseits durch die Steigerung der Energieeffizienz gehoben werden kann. Derzeit beträgt der Anteil von erneuerbaren Energien an der Deckung des Wärme-

bedarfs bei Neubauten etwa 41 %. Dieser Anteil ist überwiegend durch den Einsatz von Wärmepumpen als Wärmeerzeuger bedingt. Insgesamt wird als Energieträger jedoch zu etwa 55 % Erdgas zur Deckung des Wärmebedarfs von Wohn- und Nichtwohngebäuden eingesetzt, wobei als Wärmeerzeuger häufig Brennwertkessel eingesetzt werden [12]. Der Ansatz der Betrachtung von Quartieren als Gesamtsystem und damit als Planungs- und Bilanzraum bietet insgesamt mehr Möglichkeiten zur Systemoptimierung. So kann, durch den Einsatz von Strom- oder Wärmenetzen in Kombination mit Energiespeichern, Energie im Quartier zwischen den Gebäuden verschoben werden. Weiterhin erleichtert die Nutzung von Wärme- oder Kältenetzen die Integration von erneuerbaren Energien und ermöglicht es lokale Abwärmepotenziale im Quartier zu erschließen. Bei einer energetischen Bilanzierung des gesamten Quartiers, anstatt jedes einzelnen Gebäudes, können sich unterschiedliche energetische Niveaus einzelner Gebäude ausgleichen und damit insgesamt zum Erreichen des Zielwerts für das Quartier führen.

Die erweiterte Anzahl an Möglichkeiten im Vergleich zum Einzelgebäude bringt jedoch auch Herausforderungen mit sich. Anders als auf Gebäudeebene gibt es für die energetische Quartiersplanung keine Standardlösungen. Somit sind die Energiekonzepte, welche für ein Quartier gefunden wurden in vielen Fällen nicht auf beliebige andere Quartiere übertragbar und müssen in der Folge für jedes Quartier individuell erarbeitet werden. Zumeist lassen sich lediglich einzelne Teile aus Konzepten übertragen. Auf der Quartiersebene sind im Prozess vom Kon-

zept über die Planung bis hin zur Umsetzung von Maßnahmen eine Vielzahl an Akteuren beteiligt, weswegen sich dieser oft als kompliziert und langwierig gestaltet [11].

6.1.5 Energiekonzepte für Stadtquartiere

Für die Entwicklung eines Energiekonzepts für ein Quartier muss zunächst zwischen Neubau- und Bestandsquartieren unterschieden werden. In Bestandsquartieren müssen bei Sanierungsmaßnahmen sowie bei Änderungen des Energieversorgungssystems die vorhandenen Gebäude und Infrastrukturen als Randbedingungen mit einbezogen werden. Zudem gilt es etwaige Vorgaben des Denkmalschutzes, Aspekte der Sanierung im bewohnten Zustand, Warmmietenneutralität, Statik aufzustockender Gebäude, die Trassierung von Versorgungsnetzen sowie die Standorte von bestehenden und etwaigen neuen Energieerzeugern und Speichern mit in Betracht zu ziehen. Für Neubauquartiere kann hingegen durch rechtliche Vorgaben die Struktur des Energiesystems beeinflusst werden. Neben den Vorgaben auf Gebäudeniveau (Energieeinsparverordnung (EnEV), voraussichtlich demnächst Gebäudeenergiegesetz (GEG)), können im örtlichen Bebauungsplan Vorgaben zur Optimierung der Gebäudehülle im Hinblick auf Geometrien und Flächenpotentiale für die Nutzung erneuerbarer Energien wie Photovoltaik, Solarthermie oder Umweltwärme festgelegt werden. Weiterhin kann die zentrale Wärmeversorgung über ein Wärmenetz in Form eines Anschlusszwangs festgeschrieben werden, wodurch die Integration erneuerbarer

Energien erleichtert wird sowie die damit verbundenen CO₂-Reduktionspotentiale erschlossen werden können.

Die Erstellung eines Energiekonzepts für ein Quartier kann in typische Arbeitsschritte gegliedert werden. Zunächst werden der Nutzenergiebedarf, möglichst als Lastgang und die Objektdaten der Gebäude im Quartier ermittelt. Dabei muss in Bezug auf Gebäude und Verteilnetze zwischen Bestand und geplantem Neubau unterschieden werden. Für Bestandsquartiere erfolgt auf Basis dieser Informationen eine Bilanzierung und Bewertung des IST-Zustands im Hinblick auf Kriterien wie Wirtschaftlichkeit, CO₂-Emissionen und energetische Aspekte. Die Quartiersziele werden schließlich für den Zustand nach der Umsetzung der Maßnahme festgelegt, wobei an dieser Stelle auch zukünftige Entwicklungen wie beispielsweise energetische und wirtschaftliche Randbedingungen mit einbezogen werden müssen. Das Energieversorgungskonzept wird unter Berücksichtigung der Potenziale der Energiequellen, durch die Auswahl und Dimensionierung der Energiewandler, Energienetze und Speicher einschließlich deren Standorten erstellt. Der Energieverbrauch auf der Abnehmerseite muss hierbei für den Zielzustand nach Umsetzung der Maßnahme berücksichtigt werden. Aufgrund der Komplexität und der dynamischen Wechselwirkungen ist die Durchführung von Optimierungs- und Simulationsrechnungen sinnvoll, die einen Vergleich zwischen einer Vielzahl verschiedener Varianten der Energieversorgung im Quartier ermöglichen und Potenziale im zeitlichen Verlauf aufzeigen. Unter wirtschaftlichen, ökologischen, energetischen und technischen Kriterien

lässt sich schließlich eine Rangfolge der Varianten bzw. einzelner Maßnahmen ableiten. Für die Umsetzung der Maßnahmen muss schließlich ein optimaler zeitlicher Ablauf ermittelt werden [11].

6.2 Quartiersprojekte in der Forschungsinitiative Energiewendebauen

Im Rahmen der wissenschaftlichen Begleitforschung wurde eine Querauswertung der aktuell in der Förderinitiative Energiewendebauen geförderten Quartiersprojekte durchgeführt. Die Datenbasis für die Querauswertung bilden die Antworten aus dem im Kapitel 03 näher beschriebenen Fragebogen. Die im Folgenden erläuterten Ergebnisse geben einen Überblick über die durchgeführten Quartiersprojekte und die darin untersuchten Themen.

Die Datenbasis aus der Befragung der Förderprojekte umfasst 18 Quartiersprojekte. Projekte, die sich mit Universitäts- und Forschungscampus beschäftigen, wurden separat ausgewertet und sind daher nicht in der Datenbasis der Quartiersprojekte enthalten. Zudem wurden nur Projekte ausgewertet, bei denen mindestens ein Projektpartner den quartiersspezifischen Teil des Fragebogens abgeschlossen hat. Die Projektpartner konnten Angaben für jeweils bis zu drei Quartiere innerhalb ihres Projektes machen. Die ausgewählten 18 Projekte werden durch 38 Projektpartner repräsentiert und umfassen insgesamt 29 Quartiere. Diese Datenbasis liegt den folgenden Auswertungen zugrunde. Sofern in einer Auswertung mehrere Antworten von Teilprojekten eines Förderprojekts

vorliegen, werden die Antworten nur einmal je Förderprojekt berücksichtigt. Zu beachten ist, dass bei den Auswertungen die Grundgesamtheit für jede ausgewertete Frage entsprechend der vorhandenen Antworten neu bestimmt wird. Somit erfolgt die Nummerierung der Quartiere für jede Auswertung neu.

6.2.1 Übersicht über ausgewertete Projekte und Quartiere

Die Karte in Abbildung 6.2-1 zeigt die geographische Verteilung von insgesamt 28 Quartieren aus 17 ausgewerteten Forschungsprojekten. In einem Forschungsprojekt wurde keine Angabe zu dem Standort des Quartiers gemacht. Erkennbar ist eine bundesweite Verteilung der Quartiere, mit Schwerpunkt auf den Ballungszentren.



Abb. 6.2-1: Standorte der ausgewerteten Quartiere (Karte: OpenStreetMap, Lizenz: CC-BY-SA)

Im Fragebogen gab es die Möglichkeit für jedes Projekt bis zu zehn Schlagwörter anzugeben, die das Projekt charakterisieren, siehe Abbildung 6.2-2. Die Auswertung zeigt, dass in den 14 ausgewerteten Projekten die Themengebiete Optimierung und Monitoring am häufigsten genannt wurden. Weitere Schwerpunkte sind die Integrale Planung, Sektorenkopplung, Smart District sowie dezentrale Energieerzeugung und dezentrale Einspeisung.



Abb. 6.2-2: Allgemeine Beschreibung der Forschungsvorhaben der Projekte in Schlagwörtern

Die Abbildung 6.2-3 zeigt die kombinierte Auswertung von zwei Antwortkategorien aus dem Fragebogen. Die Frage, welcher Fokus in der betrachteten Methode bzw. im betrachteten Konzept im Projekt verfolgt wird (siehe Legende), wurde mit der Frage nach dem Untersuchungsgegenstand der Methode bzw. des Konzepts verknüpft. Durch die Kombination der Antworten beider Fragen ergibt sich eine Grundgesamtheit an Antworten von insgesamt 12 Quartiersprojekten, wobei bei beiden Fragen Mehrfachangaben zulässig waren. Durch einen Rahmen wird in der Abbildung deutlich gemacht, auf wie viele Projekte sich die Antworten je Untersuchungsgegenstand beziehen.

Die Auswertung zeigt, dass eine hohe Bandbreite an Untersuchungsgegenständen und fokussierten Aspekten in den Projekten abgedeckt wird. Die Schwerpunkte der Untersuchungen liegen im Bereich der Gebäude und Quartiere mit insgesamt 19 und 20 Angaben. Am häufigsten liegt dort der Fokus für die betrachtete Methode bzw. das Konzept auf

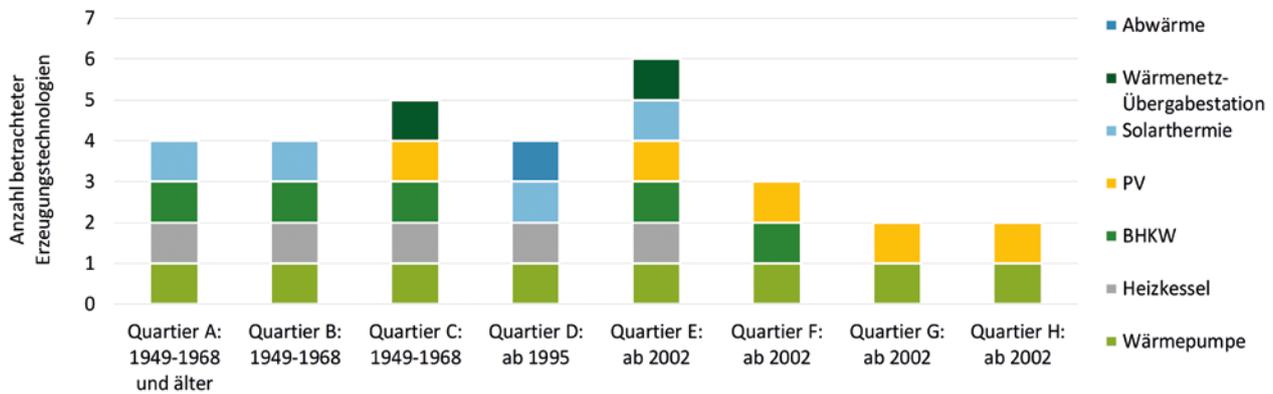


Abb. 6.2-3: Fokus & Untersuchungsgegenstand der im Projekt betrachteten Methode bzw. Konzept

energetischen Aspekten, gefolgt von technischen und wirtschaftlichen Aspekten. Eine ähnliche Verteilung bei geringerer Anzahl an Nennungen, ergibt sich bei den Technologien zur Energieerzeugung und zur Energiespeicherung sowie bei den Anlagen zur Energieverteilung bzw. Netzen. Die im jeweiligen Projekt betrachtete Methode bzw. das betrachtete Konzept beziehen sich nur in wenigen Fällen auf Kommunen / Städte bzw. auf Verwaltung / Politik. Für alle betrachteten Förderprojekte bis auf eins wurde von den Projektpartnern angegeben, um welchen Siedlungstyp es sich im untersuchten Quartier handelt. Eine Mehrfachnennung war bei dieser Frage nicht zulässig. Abbildung 6.2-4 zeigt, dass der Fokus mit 17 von 28 Quartieren auf der Betrachtung von Wohnsiedlungen liegt. Neun Mal handelt es sich um Mischgebiete und lediglich zwei Quartiere sind reine Nichtwohnsiedlungen.

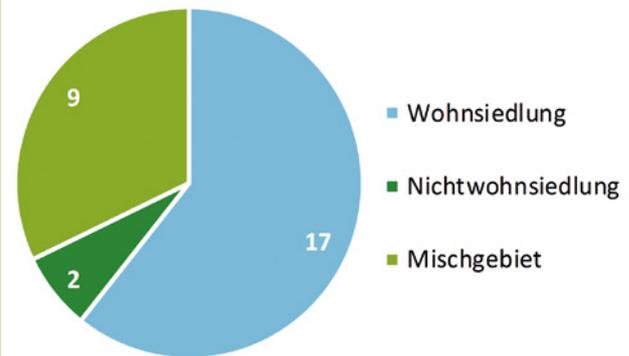


Abb. 6.2-4: Betrachtete Siedlungstypen in den ausgewerteten Quartieren

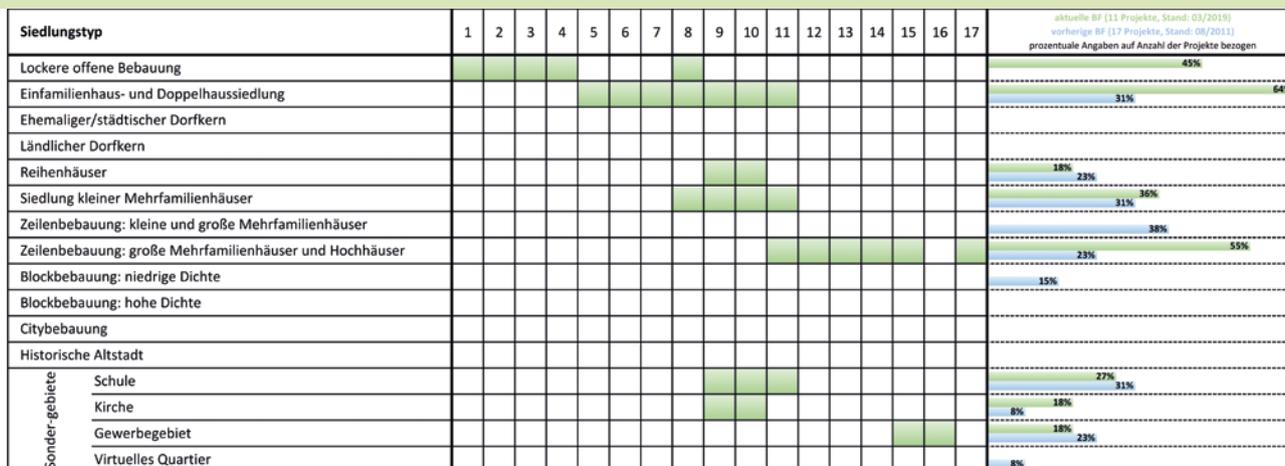


Abb. 6.2-5: Siedlungstypologie-Matrix ausgewerteter Förderprojekte, aktuelle und vorherige BF

Auskunft über die Art der Wohn- und Nichtwohnsiedlungen gibt die folgende Siedlungstypologie-Matrix in Abbildung 6.2-5. Eine Spalte in der Matrix repräsentiert eines von 17 Quartieren aus 11 Projekten, die hierfür ausgewertet wurden. Da ein Quartier mehrere Siedlungsstrukturen beinhalten kann, sind Mehrfachnennungen in den einzelnen Spalten zulässig. Im rechten Bereich der Abbildung 6.2-5 ist ein Vergleich zwischen den ausgewerteten Quartieren aus Projekten der aktuellen Begleitforschung (BF) und ausgewerteten Quartieren aus Projekten aus der vorherigen BF aus dem Jahr 2011 aufgezeigt. Campus-Quartiere werden in diesem Kapitel nicht betrachtet und sind folglich in der Auswertung nicht enthalten. Entsprechend beziehen sich die Angaben zu den früheren Quartieren auf insgesamt 13 Projekte. Zur besseren Vergleichbarkeit wurden die absoluten Zahlen auf die gesamte Anzahl der Projekte in der aktuellen und vorherigen BF bezogen.

Auffällig ist, dass weder in den früheren noch in den aktuell ausgewerteten Quartiersprojekten sowohl städtische als auch ländliche Dorfkern, Citybebauungen und historische Altstädte als Siedlungstypen vorkommen. Die Blockbebauung mit hoher Dichte ist ebenfalls ein Siedlungstyp, der in den ausgewerteten Quartieren nicht angegeben wurde. Im Bereich der lockeren und offenen Bebauung lässt sich ein Trend erkennen. In den früheren Quartiersprojekten war dieser Siedlungstyp nicht vertreten. In den aktuellen Projekten gibt es hingegen fünf Quartiere und somit 45 % aller Projekte, die diesen Siedlungstyp aufweisen. In der Zeilenbebauung verlagert sich der Fokus der Projekte von kleinen und großen Mehrfamilienhäusern (38 % vorherige BF, 0 % aktuelle BF) auf große Mehrfamilienhäuser und Hochhäuser (23 % vorherige BF, 55 % aktuelle BF). Zudem werden verstärkt Einfamilienhaus- und Doppelhaussiedlungen betrachtet (31 % vorherige BF, 64 % aktuelle BF). Im Bereich der Sondergebiete

sind Schulen, Kirchen und Gewerbegebiete weiterhin von Bedeutung.

6.2.2 Quartierstypen und Energieversorgung

In Abbildung 6.2-6 wird die Frage nach dem Siedlungstyp mit der Frage nach den Erzeugern für die Wärme-, Kälte- oder Strombereitstellung in den Quartieren verknüpft. Durch die Kreuzung ist eine Auswertung von 16 Quartieren aus 12 Projekten möglich. Jedes Quartier ist einem Siedlungstyp und einer Kombination zur Energiebereitstellung zugeordnet. In allen Quartieren bis auf ein Quartier mit einer Nicht-Wohnsiedlung werden Wärmeerzeuger betrachtet. Fünf von sieben Quartiersprojekten mit reinen Wohnsiedlungen betrachten sowohl Wärme- als auch Stromerzeuger. In den Mischgebieten liegt der Fokus auf den Wärmeerzeugern. Es gibt hier aber auch Quartiere, die neben Wärmeerzeugern, Strom und/oder Kälteanwendungen mit einbeziehen.

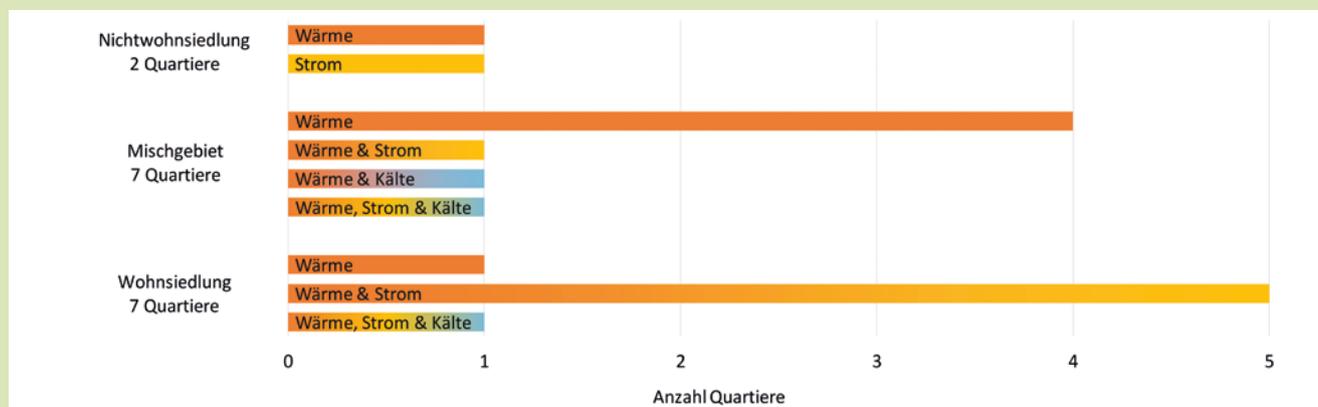


Abb. 6.2-6: Betrachtete Sektoren in den Quartieren

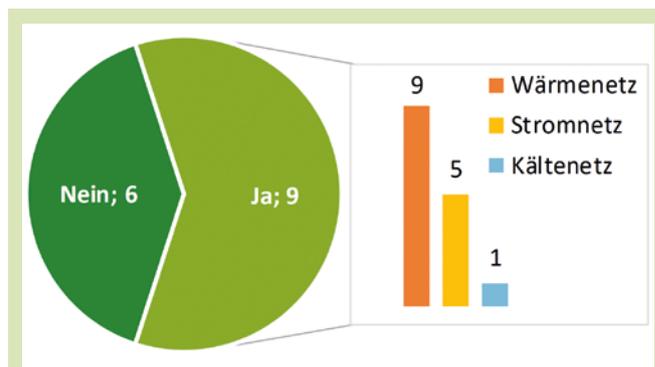


Abb. 6.2-7: Betrachtung von Versorgungsnetzen in den Quartieren

Im allgemeinen Teil des Fragebogens wurde für 15 Projekte die Frage beantwortet, ob ein Versorgungsnetz betrachtet wird. Abbildung 6.2-7 zeigt, dass in allen Projekten, für die diese Frage mit ja beantwortet wurde, ein Wärmenetz betrachtet wird. Fünf Projekte betrachten neben dem Wärmenetz zudem ein Stromnetz und ein Projekt ein Kältenetz. Eine Zuordnung zu den jeweiligen Quartieren der Projekte ist nicht gegeben.

Neben den betrachteten Sektoren und Versorgungsnetzen, haben die Projektpartner Angaben zu den eingesetzten Technologien in ihren Quartieren gemacht. Im Folgenden wird die Frage nach der Anlagentechnik in Kombination mit der Siedlungstypologie im Quartier ausgewertet. Durch die Kreuzung der Fragen ergibt sich eine Gesamtheit von 8 Quartieren aus 7 Projekten.

Abbildung 6.2-8 macht deutlich, dass alle Quartiere unabhängig von ihrer Siedlungsstruktur die Wärmepumpe als Technologie betrachten. Bei Quartieren mit hoher Wärmebedarfsdichte, wie der Zeilenbebauung, werden zudem in allen Fällen zusätzlich Heizkessel und Blockheizkraftwerke (BHKW) mit einbezogen. Weitere Technologien in diesem Kontext sind Solarthermie und Photovoltaik (PV). Darüber hinaus haben zwei Quartiere einen Anschluss an ein externes Wärmenetz. Bei Quartieren mit niedriger Wärmebedarfsdichte (lockere, offene Be-

bauung und Einfamilien- und Doppelhaussiedlung) gibt es insgesamt eine geringere Variation an berücksichtigten Technologien. Hier werden die Wärmepumpen mit PV, Heizkesseln, Solarthermie sowie Abwärmenutzung kombiniert. Einige Technologien zur Energiegewinnung bzw. zur Energiewandlung standen im Fragebogen zu Auswahl, sind bei den Antworten zu diesen acht Quartieren jedoch nicht vertreten, dies sind: Geothermie, Brennstoffzelle, Power-to-Heat, Power-to-Gas und Windenergie.

Im Weiteren werden die Technologien zur Energieerzeugung mit der Altersstruktur der Gebäude in den Quartieren gemeinsam betrachtet. Dabei ergibt sich erneut eine Grundgesamtheit von 8 ausgewerteten Quartieren, die jedoch nicht dieselben Quartiere repräsentieren, wie in Abbildung 6.2-8. Die Quartiere in Abbildung 6.2-9 sind von links nach rechts von alt nach jung angeordnet. Auch bei diesen acht Quartieren ist, unabhängig von der Alters-

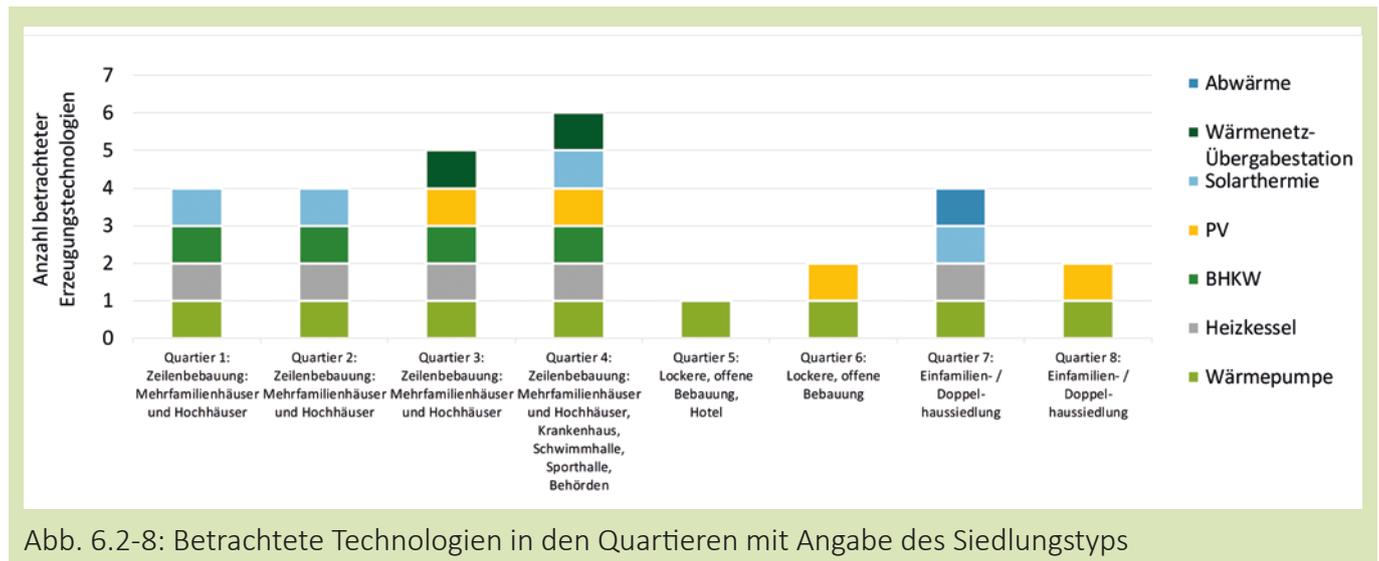


Abb. 6.2-8: Betrachtete Technologien in den Quartieren mit Angabe des Siedlungstyps

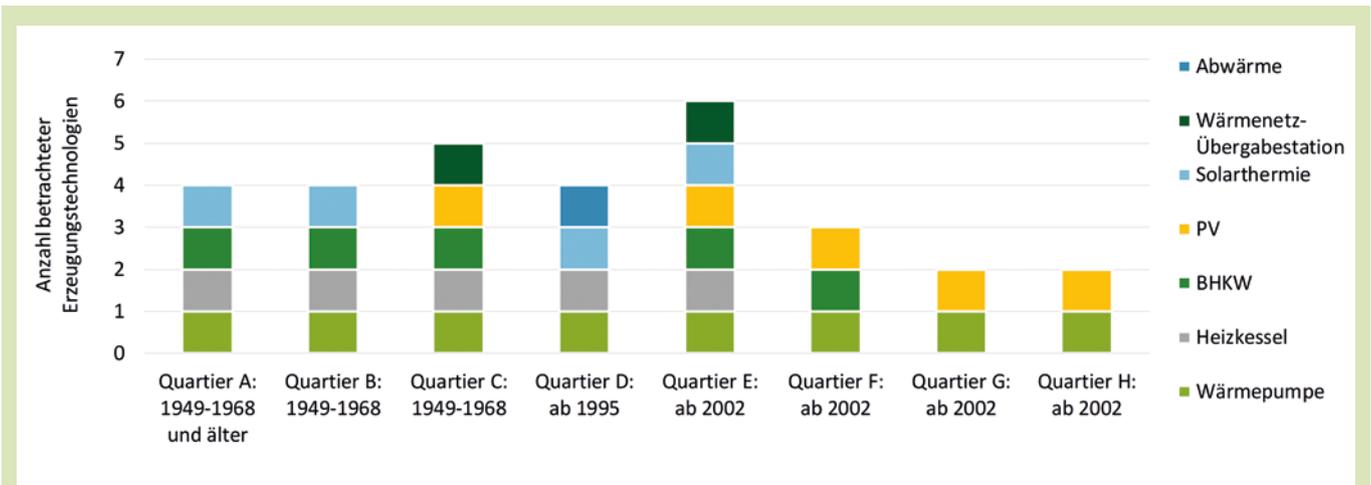


Abb. 6.2-9: Betrachtete Technologien in den Quartieren mit Angabe der Altersstruktur der Gebäude

struktur der Gebäude, die Wärmepumpe Bestandteil der Wärmeversorgung. Darüber hinaus wird in jedem Quartier eine Technologie auf Basis von erneuerbaren Energien, wie Solarthermie oder Photovoltaik (PV), betrachtet. Als Tendenz gilt, je jünger die Altersstruktur der Gebäude im Quartier desto geringer ist die Variation der eingesetzten Technologien zur Wärmeerzeugung.

In der letzten Auswertung zu den Quartiersprojekten wird gezeigt, in welchen Siedlungstypen jeweils Speicher zur Wärme-, Strom- und Kältebereitstellung untersucht werden. Für die kombinierte Auswertung der Antworten aus zwei unterschiedlichen Fragen ergibt sich eine Grundgesamtheit von 13 Quartieren aus 10 Projekten. Innerhalb der Siedlungstypen sind Mehrfachnennungen zu den Speichern im Quartier möglich. Abbildung 6.2-10 zeigt, dass Speicher am häufigsten in Wohnquartieren zum Einsatz kommen. Alle sieben ausgewerteten Quartiere betrachten Wärmespeicher. Sechs Wohn-

quartiere betrachten zusätzlich einen Stromspeicher. Im Bereich der Mischgebiete liegt der Fokus deutlich auf Wärmespeichertechnologien. Strom- und Kältespeicher sind hier jeweils nur einmal vertreten. In der einzigen Nicht-Wohnsiedlung dieser Stichprobe werden nur Stromspeicher betrachtet.

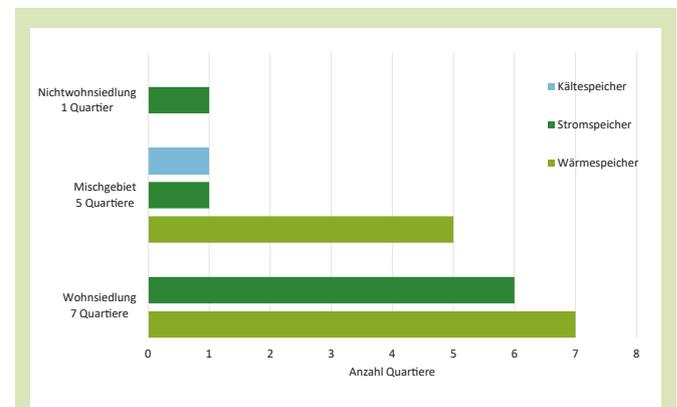


Abb. 6.2-10: Energiespeicher in den Quartieren mit Angabe des Siedlungstyps

6.2.3 Zusammenfassung

Die Auswertung aktueller Quartiersprojekte aus der Forschungsinitiative Energiewendebauen zeigt, dass es derzeit bundesweit verteilt eine Vielzahl an Förderprojekten gibt.

Thematisch liegen die Schwerpunkte der ausgewerteten Projekte in den Bereichen Monitoring, Optimierung, dezentrale Energieerzeugung und Einspeisung, Integrale Planung, Sektorenkopplung sowie Smart District. Weiterhin fokussieren sich Quartiersprojekte stark auf den energetischen, technischen und wirtschaftlichen Bereich, aber auch sozioökonomische Aspekte und der Nutzerfokus werden in einzelnen Projekten untersucht.

Im Bereich der Methoden und Konzepte wird deutlich, dass es eine große Bandbreite an Untersuchungsgegenständen in den Projekten gibt. Neben Gebäuden und Quartieren sind häufig Stromnetze bzw. Wärme- und Kältenetze sowie Technologien zur Energieerzeugung Untersuchungsgegenstand. Im Fokus stehen dabei zumeist technische-, wirtschaftliche und energetische Aspekte.

Die Siedlungstypen der in Projekten betrachteten Quartiere sind im überwiegenden Fall Wohnsiedlungen, aber auch Mischgebiete haben einen nennenswerten Anteil. Im Vergleich zu einer Auswertung von Siedlungstypen aus dem Jahr 2011 zeigt sich, dass inzwischen neben Zeilenbebauungen mit großen Mehrfamilienhäusern und Hochhäusern zunehmend auch Einfamilienhaus- und Doppelhaus-siedlungen in den Projekten betrachtet werden.

Die Auswertung zu den betrachteten Sektoren in den Quartieren zeigt, dass bei Wohnsiedlungen

der Wärme- und Stromsektor in Kombination am häufigsten betrachtet werden. Bei Mischgebieten bildet die Betrachtung des Wärmesektors einen Schwerpunkt.

Sofern ein Versorgungsnetz für das Quartier im Projekt betrachtet wird, ist dies in allen ausgewerteten Fällen ein Wärmenetz. Damit ist insgesamt in mehr als der Hälfte aller ausgewerteten Quartiersprojekte ein Wärmenetz Projektbestandteil.

Bei der Betrachtung der Energieerzeugungstechnologien für einzelne Siedlungstypen gibt es eine Tendenz zu einer multivalenten Wärmeerzeugung für den Siedlungstyp Zeilenbebauung mit Mehrfamilienhäusern und Hochhäusern. Eine mono- oder bivalente Wärmeerzeugung hingegen wird eher für Quartiere mit dem Siedlungstyp Lockere offene Bebauung sowie Einfamilienhaus- und Doppelhaus-siedlung vorgesehen.

Im Fall der Auswertung der betrachteten Erzeugungstechnologien je nach Altersstruktur der Gebäude im Quartier zeigt sich, dass Wärmepumpen sowohl für den Neubau als auch für den Bestand in allen Quartieren vorkommen. Auch Heizkessel und BHKW werden oft betrachtet, in der Regel zur Kostenreduktion oder als Spitzenlastherzeuger. Erzeugungstechnologien auf Basis erneuerbarer Energien sind in der Auswertung in jedem Quartiersprojekt vertreten, zumeist kommt entweder Solarthermie oder Photovoltaik zum Einsatz, nur in einem Quartier beide Technologien in Kombination.

Im Projekt untersuchte Speichertechnologien sind bei den ausgewerteten Wohnsiedlungen häufig Wärme- und Stromspeicher, in Mischgebieten hingegen dominiert der Einsatz von Wärmespeichern.

Literatur

- [1] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, Abkommen von Paris. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, 2020, <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Artikel/Industrie/klimaschutz-abkommen-von-paris.html> [Zugriff am: 24.02.2020]
- [2] Intergovernmental Panel on Climate Change, Global Warming of 1.5°C – Summary for Policymakers. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty. Intergovernmental Panel on Climate Change, 2018, https://report.ipcc.ch/sr15/pdf/sr15_spm_final.pdf [Zugriff am: 24.02.2020]
- [3] Sharifi, A.; Yamagata, Y., Principles and criteria for assessing urban energy resilience: A literature review. In: Renewable and Sustainable Energy Reviews 60 (2016), S. 1654-1677
- [4] European Commission, Energy performance of buildings directive. European Commission, 2019, https://ec.europa.eu/energy/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/energy-performance-buildings-directive_en?redir=1 [Zugriff am: 25.02.2020]
- [5] European Commission, Climate strategies & targets. European Commission, https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies_en [Zugriff am: 25.02.2020]
- [6] Deutsche Energie-Agentur GmbH, Europäische Gebäudeberichtlinie (EPDB), <https://www.zukunft-haus.info/studien-gesetze/gesetze/epdb/> [Zugriff am: 25.02.2020]
- [7] Deutsche Energie-Agentur GmbH, Bedeutung der Gebäude für die Energiewende erkennen, <https://www.dena.de/themen-projekte/energieeffizienz/gebaeude/energiepolitik-gebaeude/> [Zugriff am: 26.02.2020]
- [8] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, Energieforschungsförderung der Bundesregierung: Das Gesamtsystem im Blick – Neu im 7. Energieforschungsprogramm: Technologieübergreifende Querschnittsthemen ergänzen die technologiespezifischen Schwerpunkte. Technologiespezifische Förderschwerpunkte, Gebäude und Quartiere. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, 2018, <https://www.energieforschung.de/energieforschungspolitik/energieforschungsprogramm/foerderschwerpunkte> [Zugriff am: 26.02.2020]
- [9] Umweltbundesamt, Energieaufwand für Gebäudekonzepte im gesamten Lebenszyklus – Abschlussbericht. Steinbeis-Transferzentrum für Energie-, Gebäude- und Solartechnik & Fraunhofer Institut für Bauphysik IBP, 2019, https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2019-10-29_texte_132-2019_energieaufwand-gebaeudekonzepte.pdf [Zugriff am: 26.02.2020]
- [10] Deutsche Energie-Agentur GmbH, dena-GEBÄUDEREPORT KOMPAKT 2019 – Statistiken und Analysen zur Energieeffizienz im Gebäudebestand, 2019, https://www.dena.de/fileadmin/dena/Publikationen/PDFs/2019/dena-GEBAEUDEREPORT_KOMPAKT_2019.pdf [Zugriff am: 27.02.2020]
- [11] Erhorn-Kluttig, H.; Jank, R.; Schrempf, L. et al., Energetische Quartiersplanung: Methoden - Technologien - Praxisbeispiele. Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, 2011
- [12] Weißmann, C.; Wörner, P., Entwicklung von thermischen Gebäudelastprofilen für die Dimensionierung von Wärmeerzeugern und zur Simulation von Nahwärmenetzen. In: Bauphysik 39 (2017), Heft 5, S. 291-298

Kontakt-Adresse:

Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits-
und Energietechnik UMSICHT

Dipl.-Ing. Matthias Schnier
matthias.schnier@umsicht.fraunhofer.de

Sonja Witkowski, M.Sc.
sonja.witkowski@umsicht.fraunhofer.de

Tom Seelig, B.Sc.
tom.seelig@umsicht.fraunhofer.de

Dipl.-Ing. Carsten Beier
carsten.beier@umsicht.fraunhofer.de

6.3 Vision 2020: kommunale netzgebundene Energieversorgung in Wüstenrot (EnVisaGe + EnVisaGePlus)

Projektpartner:

- Koordination: HFT Stuttgart - Forschungszentrum Nachhaltige Energietechnik/ zafh.net (Projektleitung: Dr. Dirk Pietruschka)

Partner:

- Gemeinde Wüstenrot
- Doppelacker GmbH
- Liacon Batteries GmbH
- ads-tec GmbH
- Technische Hochschule Nürnberg – Institut für Energie und Gebäude
- Stadtwerke Schwäbisch Hall

Durchlaufene Projektphasen: Konzept/Planung - Umsetzung- Monitoring



Abb. 6.3-1: Plusenergiesiedlung Wüstenrot (Foto: zafh.net/Pietzsch)

Bauliche Ausgangslage: Neubau

Siedlungstyp: Ein- und Mehrfamilienhäuser, lockere Bebauung

Energieversorgung

- vorher: keine
- nachher: Kaltes Nahwärmenetz mit „Agrothermiekollektor“ als Niedertemperaturquelle; Wärmepumpen, PV-Anlagen, thermische und elektrische Speicher in den Gebäuden

6.3.1 Die Siedlung „Vordere Viehweide“ als Baustein zum Plusenergiestatus

Die Plusenergiesiedlung „Vordere Viehweide“ in der Gemeinde Wüstenrot im Nordosten Baden-Württembergs wurde im Rahmen des vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie geförderten

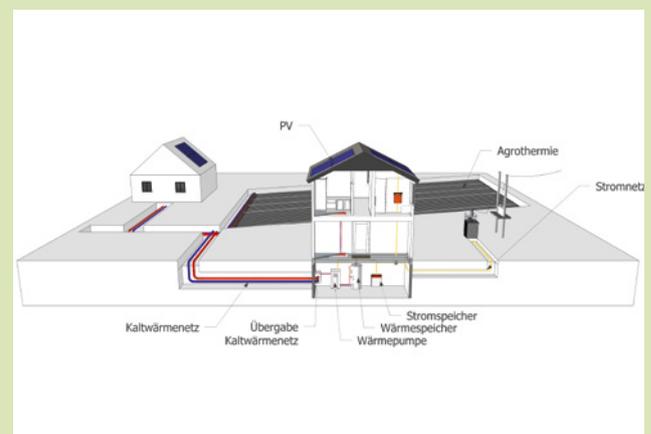


Abb. 6.3-2: Verlegung des Agrothermiekollektors (Foto: zafh.net/Pietzsch)

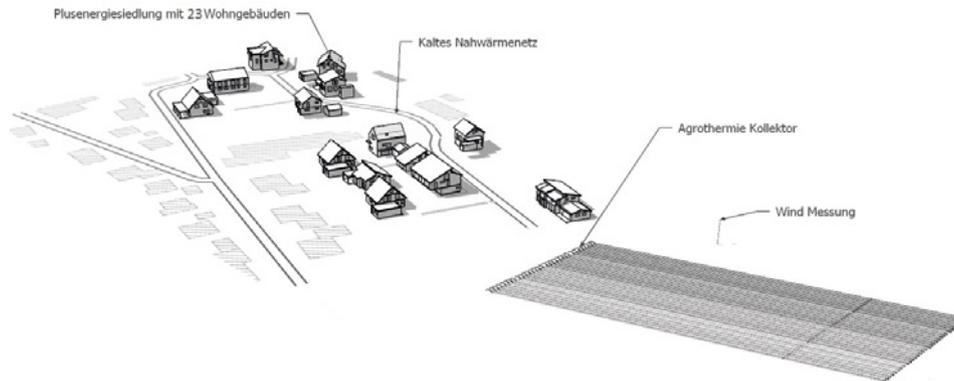


Abb. 6.3-3: Die Plusenergiesiedlung Vordere Viehweide (Quelle: Marcus Brennenstuhl, [2])

Forschungsprojekts „EnVisaGe“ [1] geplant und gebaut. Sie ist Teil einer größeren Strategie, die mit dem Ausbau erneuerbarer Energiequellen das Ziel verfolgt, den gesamten Energiebedarf der Gemeinde zu decken und somit den Plusenergiestatus für Wüstenrot zu erreichen. Ein erster konkreter Schritt zur bilanziell autarken Energieversorgung erfolgte mit dem Bau der nachfolgend vorgestellten und in Abbildung 6.3-1 schematisch dargestellten Plusenergiemustersiedlung.

6.3.1.1 Energetisches Konzept für die Plusenergiesiedlung in Wüstenrot

Die 14,7 ha umfassende Plusenergie-Modellsiedlung „Vordere Viehweide“ ist ein großflächig mit geothermischer Wärme versorgtes Wohnquartier, bestehend aus 23 Wohngebäuden mit hohem Wärmedämmstandard (KfW 55, EnEV 2009/2014), erbaut von 2012 bis 2017. Die Wärmeversorgung für das Wohnquartier erfolgt über ein kaltes Nahwärmenetz (KNW-Netz) mit angeschlossenen Erd-

wärmekollektoren. Alle Gebäude sind mit dezentralen Wärmepumpen, thermischen Pufferspeichern, PV-Anlagen zwischen 6 und 28 kWp und teils mit Batteriespeichern ausgestattet. Für die Wärmeversorgung werden hoch effiziente Wärmepumpen (WP) eingesetzt, die an das kalte Nahwärmenetz angeschlossen sind und mit eigenerzeugtem PV-Strom betrieben werden. Das kalte Nahwärmenetz speist sich aus dem sogenannten „Agrothermiekol-

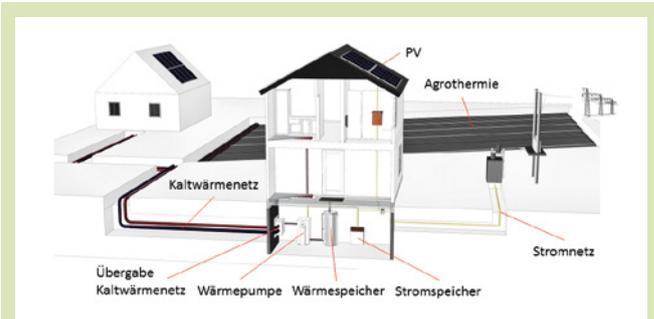


Abb. 6.3-4: Struktur der Wärme- und Stromenergieversorgung der Plusenergiesiedlung in Wüstenrot (Quelle: Marcus Brennenstuhl, [3])

lektor“ als Niedertemperaturquelle, ein europaweit erstmals nach dem System der Doppelacker GmbH in Petershagen angelegter großer oberflächennaher Erdwärmekollektor. Alle Energieflüsse der Siedlung steuert ein intelligentes Lastmanagement, eingebunden in ein virtuelles Kraftwerk. Damit war die Gemeinde Wüstenrot eine der ersten Kommunen in Deutschland, die einen horizontalen Wärmetauscher zusammen mit einem KNW-Netz einrichteten und einem detaillierten Monitoring unterzogen. Das energetische Konzept der Siedlung ist in Abbildung 6.3.2 dargestellt.

6.3.1.2 Der Agrothermiekollektor

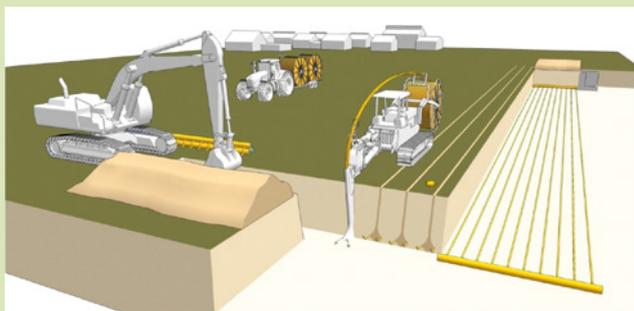


Abb. 6.3-5: Thermische Aktivierung des Untergrundes durch Einlassen von Rohrleitungen mit einem Spezialpflug (Quelle: Doppelacker GmbH)

Das agrothermische Kollektorfeld besteht aus parallel zueinander liegenden Rohrleitungen, die in einem Abstand von 0,5–1 Meter verlaufen. Sie wurden mit einem Spezialpflug in einer Tiefe von ca. 2 Metern in den Boden eingebracht (Abb. 6.3-5). Diese neue Technik ermöglicht eine schnelle und einfache Installation ohne umfangreiche Erdarbeiten

und erhält die vorhandene Bodenschichtung. Die Rohre verlaufen so weit unter den Pflanzenwurzeln, dass sie den landwirtschaftlichen Ertrag durch den Wärmeentzug nicht beeinträchtigen [4]. Der Agrothermiekollektor liefert auf diese Weise Niedertemperaturwärme (2 °C–15 °C) zur Beheizung und Warmwasserbereitung und ermöglicht im Sommer zugleich eine kostengünstige und natürliche Kühlung der Gebäude.

6.3.1.3 Planung und Umsetzung - mit einigen Überraschungen

Zu Projektbeginn war geplant, 25 Gebäude mit einem geschätzten Gesamtwärmebedarf von ca. 520 MWh/Jahr an das KNW-Netz anzuschließen, einschließlich einer möglichen Erweiterung zum Anschluss von fünf bestehenden und zehn zusätzlichen Neubauten in einem zweiten Bauabschnitt. Es wurde geschätzt, dass aus dem Erdreich zwischen 40 und 70 kWh/m² pro Jahr gewonnen werden kann und die Kollektorgröße entsprechend zwischen etwa 5.500 und 9.750 m² ausgelegt werden musste. Der Kollektor sollte geeignet sein, alle geschätzten Spitzenlasten abzudecken. Demzufolge wurde das Kollektorfeld in zwei Bauabschnitten geplant, um schrittweise mit der Plusenergie-Siedlung „mitzuwachsen“.

Für den Bau eines 15.000 m² großen Kollektorfeldes wurden zunächst Kosten von 240.000 € kalkuliert. 34.000 € wurden zusätzlich berechnet, um das Netz und den Kollektor mit Monoethylen-Glykol zu füllen. Für den Bau des KNW-Netzes wurden Kosten von 350 €/m angenommen. Um die neuartige Techno-

logie zu unterstützen, gewährte das BMWi im Rahmen des Projekts eine Förderung von 246.000 €. Tatsächlich konnte der Kollektor nicht zum kalkulierten Preis erstellt werden. Die Projektkosten erhöhten sich durch vereinzelt Felsbrocken im Grund und durch höhere Kosten für den Transport von Maschinen und die Installation des Monitoring-Equipments. Insgesamt lagen die Endkosten der ersten Kollektorbauphase bei 240.000 €- also so hoch wie für beide Bauabschnitte ursprünglich gemeinsam geplant – woraus sich spezifische Kosten von 54,5 €/m² Kollektorfläche ergaben. Erfreulicherweise zeigte jedoch der Probetrieb des KNW-Netzes, dass der tatsächliche Wärmeentzug des Bodens höher war als in der Planungsphase geschätzt. So erwies sich das im ersten Bauabschnitt errichtete Kollektorfeld von 4.400 m² als völlig ausreichend, um die 23 Gebäude der Siedlung zu versorgen. Ohne die Widrigkeiten und Zusatzkosten der Pilotphase kann man davon ausgehen, dass die Kollektorbaukosten bei Systemen dieses Typs um 50 % bis 70 % reduziert werden können [4].

6.3.1.4 Das Kalte Nahwärmenetz und die Anbindung der Gebäude

Das KNW-Netz besteht aus einem Zweirohrsystem mit einem Rohrleitungsdurchmesser der Größe DN250 und hat eine Gesamtnetzlänge von ca. 500 m. Es gibt mehrere Gründe, warum die Rohrleitungen überdimensioniert sind. Einer ist, dass das Netz mit Blick auf eine zukünftige Erweiterung geplant wurde. Zum anderen arbeitet die Verrohrung als thermischer Puffer. Da es bei kalten Nahwärme-

netzen keine thermischen Verluste gibt [5], ist keine Isolierung erforderlich, was die Kosten für das Rohrmaterial deutlich reduziert.

Innerhalb des KNW-Netzes wird ein 20 %iges Monoethylenglykol-Wasser-Gemisch verwendet. Eine permanente Zirkulation ist nicht erforderlich, da auch bei Stillstand die Bodentemperatur immer verfügbar bleibt. Die Zirkulation wird von den einzelnen Wärmepumpen bei Bedarf erzeugt.

Jedes Gebäude wird mit dezentralen Wärmepumpen in Kombination mit thermischen Pufferspeichern beheizt, von denen einige regelbar sind. Die installierten Wärmepumpen haben eine thermische Leistung zwischen 6 und 20 kW, je nach Gebäudegröße. Derzeit liegt der Spitzenwärmebedarf der Gebäude bei ca. 186 kW, woraus nach Abzug des Wärmepumpenstroms bei einer JAZ von 4,0 ein netzseitiger Spitzenwärmebedarf von 140 kW und ein Durchfluss von ca. 32 m³/h erzeugt wird [4].

6.3.2 Die Siedlung geht „in Betrieb“

6.3.2.1 Wärmeentzugsleistung des Kollektors

Die Vorlauftemperatur des Niedertemperaturnetzes folgt dem jahreszeitlichen Verlauf der Umgebungstemperatur mit einer Verzögerung von ca. 1-2 Monaten (Abb. 6.3-4). Dies liegt an der oberflächennahsten Verlegung in zwei Metern Tiefe. Entsprechend hat die jahreszeitlich bedingte Bodentemperatur direkten Einfluss auf die Temperatur der Kollektorträgerflüssigkeit.

In Abbildung 6.3-6 sind neben den Temperaturen auch die mittleren monatlichen Arbeitszahlen (AZ)

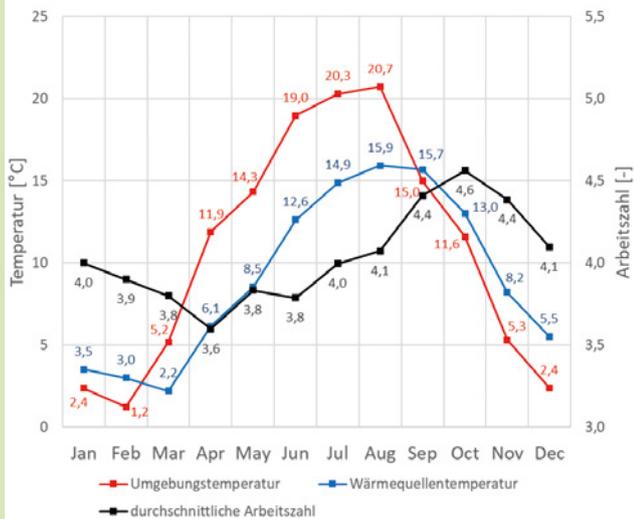


Abb. 6.3-6: Vergleich der Vorlauftemperatur des KNW-Systems mit der Umgebungstemperatur und Darstellung der jeweils erzielten monatlichen Arbeitszahl (Quelle: Robin Zeh)

von sechs intensiv gemonitorten Wärmepumpen dargestellt. Aus der Grafik wird ersichtlich, dass die AZ direkt von der Quelltemperatur des KNW-Netzes abhängt. Im Sommer, wenn nur Warmwasser bereitgestellt werden muss, ist der Effekt der Quelltemperatur stärker. Die besten Arbeitszahlen werden im Oktober erreicht, wenn die Quelltemperatur des Netzes hoch ist und gleichzeitig der Raumwärmebedarf steigt. Im Januar ist die Quelltemperatur noch hoch genug und der Raumwärmebedarf übersteigt den Warmwasserbedarf um 90 %, was ebenfalls zu guten Arbeitszahlen führt. Im Mai und Juni, wenn der Raumwärmebedarf geringer wird, werden niedrigere AZ-Werte erreicht. Die niedrigsten Wirkungsgrade ergeben sich zum Ende der Heizperiode im

März/April. Zu diesem Zeitpunkt ist die Quelltemperatur am geringsten und der Wärmebedarf nach wie vor relativ hoch. Anzumerken bleibt, dass in den Monaten Februar bis April vereinzelte Ausfälle der Messtechnik zu Lücken in der Datenbank führten. Dies kann der Grund für die auffällig niedrige mittlere Arbeitszahl im April sein.

6.3.2.2 PV-System und Energiebilanz

Alle Gebäude sind mit PV-Anlagen mit einer Spitzenleistung zwischen 6 und 28 kWp ausgestattet, insgesamt ca. 230 kWp mit einer jährlichen PV-Stromproduktion von ca. 210 MWh. Damit produzieren die Gebäude in der Jahresbilanz etwa 90 % ihres Stromverbrauchs einschließlich des Wärmepumpen- und Haushaltsbedarfs. Ohne Batteriespeicher können davon jedoch nur ca. 33 % zeitgleich genutzt werden, der Rest wird in das Stromnetz eingespeist.

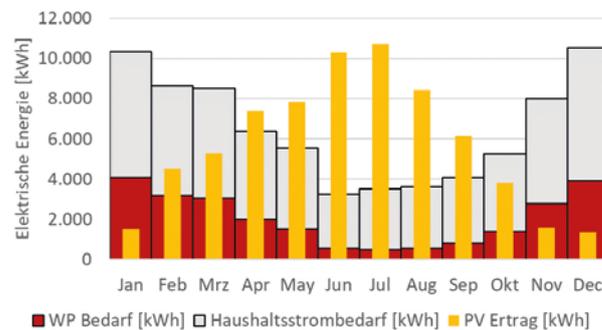


Abb. 6.3-7: Gemessene monatliche PV-Stromproduktion und Bedarf von fünf intensiv gemonitorten Gebäuden ohne Batteriespeicher während der letzten drei Jahre (Quelle: Robin Zeh, [2]).

In der Bilanz von fünf intensiv gemonitorten Gebäuden (Abb. 6.3-7) ist zu erkennen, dass die PV-Stromproduktion der Monate November, Dezember und Januar nicht ausreichend ist, um den Strombedarf der Wärmepumpen bilanziell zu decken. Um dies zu lösen, ist ein saisonaler elektrischer Speicher oder eine größere PV-Anlagen erforderlich. Bilanziell kann der Strombedarf in der Hälfte des Jahres mit PV gedeckt werden. Tatsächlich kann der Strombedarf der Gebäude zwischen 16 % im Januar und 70 % im Juli von den installierten PV-Anlagen gedeckt werden.

Sechs der 23 Gebäude sind mit Batteriespeichern von 5 kWh Kapazität ausgestattet, was den Eigenverbrauch um ca. 20 % erhöht [6, 7]. Angesichts eines Strompreises für Privatkunden von ca. 0,29 € und einer Einspeisevergütung die bei ca. 0,11 € liegt, wird die Erhöhung der Eigenverbrauchsrate aus ökonomischer Sicht immer rentabler.

6.3.2.3 Optimierung

Mit Hilfe von 24-Stunden-Prognosen der Umgebungstemperatur und der Globalstrahlung werden optimierte Zeitpläne für den Wärmepumpenbetrieb am Folgetag erstellt, die in einem flexiblen Tarifmodell verschiedene Optimierungsziele wie den höchsten Eigenverbrauch und die niedrigsten Stromkosten berücksichtigen. Verschiedene Solltemperaturen sowie Ein- und Ausschaltpläne der Wärmepumpe wurden getestet, um die Pufferspeicher zu laden und die Raumtemperatur unter Ausnutzung der thermischen Masse des Gebäudes zur Energiespeicherung zu erhöhen.

6.3.3 Lessons Learned

6.3.3.1 Power-to-Heat-Potenziale für stabile Netze

Generell bieten Wärme- und Kältenetze die Möglichkeit, eine Vielzahl von erneuerbaren Energien sowie Abwärme in das Wärmeversorgungskonzept eines Stadtteils einzubinden. Konventionelle Heiznetze erweisen sich dafür aber leider oft als ineffizient, weil die benötigten Wärmedichten bei höheren Gebäudeenergiestandards und speziell in ländlichen Gebieten fehlen.

Gleichzeitig wird Power-to-Heat immer interessanter: KNW-Netze und Wärmepumpen für die Sektorkopplung einzusetzen, ist ein sehr vielversprechender Ansatz. In Deutschland lag der Anteil der erneuerbaren Energien am gesamten Stromverbrauch 2018 bei ca. 40 % [8], aber ihr Anteil an der Wärmeerzeugung nur bei etwa 14 % [9]. Die Nutzung von Stromüberschüssen für Heizzwecke (Power-to-Heat) ermöglicht zudem ein netzstabilisierendes Management von Stromnetzen angesichts eines sich stetig erhöhenden EE-Anteils mit hoher Volatilität. Power-to-Heat-Anwendungen auf Basis von Wärmepumpen zeigen hier ein vielversprechendes und bisher kaum ausgeschöpftes Potenzial.

6.3.3.2 Intelligente Steuerung und Eigenverbrauchssteigerung

Die Plusenergiesiedlung in Wüstenrot nutzt solche Lastverschiebepotenziale in der intelligenten Steuerung der thermischen und elektrischen Speicher. Es wurden dazu Prognose- und Optimierungsalgo-

rithmen implementiert, die den Wärmepumpenbetrieb in Zusammenarbeit mit den Speichern so optimieren, dass der Eigenverbrauch erhöht wird, flexible Stromtarife genutzt werden können und eine Beteiligung an den Strommärkten ermöglicht wird. Für das KNW-Netz hat sich gezeigt, dass das Konzept in Zukunft bei wettbewerbsfähiger Wärme funktionieren kann. Auf der Gebäudeebene sind so unter idealen Bedingungen bis zu 50 % Kosteneinsparungen mit der Eigenverbrauchsoptimierung von PV-Strom möglich.

6.3.3.3 Hürden der Eigenverbrauchsoptimierung

Die Hürden für die Erhöhung des Eigenverbrauchs bestehen darin, dass im Sommer nur Warmwasserbedarf besteht. In der Übergangszeit und im Winter besteht ein hoher Wärmebedarf, der PV-Ertrag ist jedoch deutlich geringer. Auch in dieser Zeit stimmt die Leistung der PV-Anlagen nicht mit dem Wärmepumpenbedarf überein, so dass auch bei einer täglichen PV-Spitzenproduktion zusätzlich Strom aus dem Netz entnommen werden muss. Es ist zu konstatieren, dass die Warmwasserspeicher tendenziell zu klein dimensioniert sind. Durch die Installation größerer thermischer Pufferspeicher und die Anpassung der installierten PV-Winterleistung an den Bedarf der Wärmepumpe könnte das System optimiert werden.

Dieser Bericht stellt wissenschaftliche Ergebnisse aus einem Forschungsvorhaben vor, das unter der Leitung von Dr. Dirk Pietruschka, HFT Stuttgart, bearbeitet wurde. Das Projekt EnVisaGe und das Folgeprojekt EnVisaGe Plus wurden durch die Bundesrepublik Deutschland im Rahmen der Forschungsinitiative EnEff:Stadt/EnEff:Wärme gefördert. Zuwendungsgeber ist das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Literatur

- [1] Gemeinde Wüstenrot. EnVisaGe-Projekthomepage; www.envisage-wuestenrot.de
- [2] M. Brennenstuhl, R. Zeh, R. Otto, R. Pesch, V. Stockinger, und D. Pietruschka, „Report on a Plus-Energy District with Low- Temperature DHC Network, Novel Agrothermal Heat Source and Applied Demand Response,“ Appl. Sci., 2019.
- [3] M. De Rosa, M. Brennenstuhl, C. A. Cabrera, U. Eicker, and D. P. Finn, “An Iterative Methodology for Model Complexity Reduction in Residential Building Simulation,“ S. 1–20, 2019.
- [4] F. Bava, A. Hussein, M. Cozzini, FLEXYNETS Deliverable 6.5–Report on Early Adopters Case Studies; Bozen 2018.
- [5] R. Zeh und V. Stockinger, „Kalte Nahwärme – Wärme und Kälteversorgung der Zukunft für Quartiere“, Ingenieur Spiegel, 2018
- [6] M. Brennenstuhl, D. Lust, P. Boch, M. Yadack, U. Eicker, „The Potential of Small Wind Turbine Integration in Residential Buildings Complementing PV and Heat Pump Operation. Tagungsband der ISEC Konferenz Renewable Heating, Cooling, Integrated Urban Industrial Energy Systems, Graz 2018; S. 331–339.
- [7] D. Pietruschka, M. Brennenstuhl, B. Matthiss, J. Binder, “Decentralised heat pumps and small electricity storages as active components in a virtual power plant for smart grid services“. Tagungsband der 15th IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC 2015), Rom 2015; S. 737–741.
- [8] B. Burger, „Öffentliche Nettostromerzeugung in Deutschland im Jahr 2018“; Fraunhofer ISE: Freiburg, 2019.
- [9] Umweltbundesamt Dessau, „Erneuerbare Energien in Zahlen“; <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/erneuerbare-energien/erneuerbare-energien-in-zahlen>

Kontakt-Adresse:

HFT Stuttgart
zafh.net – Zentrum für Nachhaltige Energietechnik

Marcus Brennenstuhl, M.Sc.
marcus.brennenstuhl@hft-stuttgart.de

Dr. Dirk Pietruschka
dirk.pietruschka@hft-stuttgart.de

Ursula Pietzsch, M.A.
ursula.pietzsch@hft-stuttgart.de

Technische Hochschule Nürnberg
Institut für Energie und Gebäude

Robin Zeh, M.Eng.
robin.zeh@th-nuernberg.de

Prof. Dr. Volker Stockinger
volker.stockinger@th-nuernberg.de

6.4 Energieeffiziente Wohnsiedlungen durch zukunftsfähige Konzepte für den denkmalgeschützten Bestand – Energieoptimiertes Quartier Margarethenhöhe Essen (EnQM)

Projektpartner:

- Universität Stuttgart, Institut für Werkstoffe im Bauwesen (Verbundkoordination)
- Margarethe Krupp Stiftung für Wohnungsfürsorge
- Gas- und Wärme-Institut Essen e.V.
- RWTH Aachen, Lehrstuhl für integrierte Analogschaltungen und Lehrstuhl für Gebäude- und Raumklimatechnik

Durchlaufene Projektphasen: Bestandsuntersuchung – Entwicklung von Demonstratoren – Umsetzung in Beispielobjekten



Abb. 6.4-1: Bebauung Waldlehne, Margarethenhöhe Essen (Quelle: Christiane Ditzen, Universität Stuttgart)

Bauliche Ausgangslage: Bestandsgebäude

Siedlungstyp: Reihenhäuser, Doppelhäuser, kleine Mehrfamilienhäuser

Energieversorgung:

- vorher: Eigene Wärmeversorger für jede Wohneinheit, unterschiedliche Energieträger wie Gastherme für Heizung und Brauchwasser, vereinzelt auch Durchlauferhitzer (Strom) und Nachtspeicherheizungen.
- nachher: Im Rahmen anstehender Sanierungen Eignungsprüfung und Einbau von Solardachsteinen (thermisch und elektrisch aktiviert), Erdwärmesonden, Niedertemperaturheizungen, Wärmepumpen, Strom- und Warmwasserspeichern, Modellierung eines Nahwärmenetzes für einen möglichen Ausbau zum netzreaktiven Quartier



Abb. 6.4-2: Bebauung Kleiner Markt, Margarethenhöhe Essen (Quelle: Christiane Ditzen, Universität Stuttgart)

6.4.1 Ausgangssituation

6.4.1.1 Die Margarethenhöhe

Die Gartenstadt Margarethenhöhe befindet sich auf einer Anhöhe südwestlich der Essener Innenstadt. Sie wurde auf die Initiative Margarethe Krupps hin in den Jahren 1909 bis 1933 durch den Architekten Georg Metzendorf geplant und gebaut. Dieser seit 1987 denkmalgeschützte Bereich umfasst 586 zumeist 1,5- bis 3,5-geschossige Reihen- und Doppelhäuser und kleinere Mehrfamilienhäuser. Die einheitliche, kleinteilige Architektur und starke Durchgrünung des Viertels sorgen für eine hohe Attraktivität bei den Bewohnern und Bekanntheit weit über die Stadtgrenzen hinaus. Auch heute noch befindet sich die Siedlung vollständig im Besitz der Margarethe Krupp-Stiftung für Wohnungsfürsorge. Hier leben aktuell ca. 2.500 Personen.

Für denkmalgeschützte Gebäude besteht die Möglichkeit, sich zum Schutz der erhaltenswerten Bausubstanz oder des Erscheinungsbildes von den Vorgaben der Energieeinsparverordnung befreien zu lassen. Dies und die Kleinteiligkeit der Siedlungsstruktur führen dazu, dass effizienzsteigernde Maßnahmen, welche über den Komfort der Bewohner hinausgehen, als unwirtschaftlich angesehen und nicht in Betracht gezogen werden.

6.4.1.2 Das Verbundvorhaben EnQM

Im Rahmen des Verbundvorhabens EnQM werden innerhalb von vier Jahren Lösungen für energetische Verbesserungen nach einem ganzheitlichen Gebäude- und Quartiersansatz für die Margarethenhöhe entwickelt und an beispielhaften Objekten vor Ort erprobt. Damit soll gezeigt werden, wie durch energetische Sanierung, innovative Gebäudetechnik und intelligente elektrische, thermische und digitale Vernetzung auch denkmalgeschützte Quartiere energetisch optimiert werden können. Es werden Maßnahmen optimiert und eingebaut, mit denen sich durch große Stückzahlen sowohl für einzelne Gebäude als auch für die ganze Siedlung deutliche energetische Verbesserungen erreichen lassen.

Die vier Partner – Universität Stuttgart, Institut für Werkstoffe im Bauwesen (Verbundkoordination), Margarethe Krupp-Stiftung für Wohnungsfürsorge, Gas- und Wärme-Institut Essen e.V. und RWTH Aachen, Lehrstuhl für integrierte Analogschaltungen und Lehrstuhl für Gebäude- und Raumklimatechnik – arbeiten mit diesem Ziel in vier Teilprojekten zusammen:

- TP 1 – Ganzheitliche Sanierungskonzepte für Baudenkmale
- TP 2 – Entwicklung und Erprobung denkmalgerechter Technologien
- TP 3 – Intelligente Quartiersvernetzung und Energieflussoptimierung
- TP 4 – Umsetzung im Quartier

6.4.2 Energetische Konzepte

6.4.2.1 Komponenten des Energiekonzepts

Für den denkmalgeschützten Bereich der Margarethenhöhe werden im Vorhaben mehrere Ansätze für eine zukünftig stärker regenerative, effizientere Energieversorgung verfolgt. Zum einen wird überprüft, inwieweit sich die bestehende Bausubstanz im Rahmen der bei Mieterwechsel regelmäßig möglichen Sanierungsarbeiten denkmalgerecht ertüchtigen lässt. Dabei soll mit mehreren Maßnahmen die Gebäudehülle gedämmt und die Energieversorgung durch herkömmliche Heizkessel zur Nutzung regenerativer Energien umgebaut werden. Zum anderen werden durch Modellierung des ganzen Quartiers Szenarien simuliert, die zeigen, wie sich diese Veränderungen in den nächsten Jahren auswirken könnten und mit welchen ergänzenden Maßnahmen bei der Wärme- und Stromversorgung des ganzen Quartiers die Entwicklungen im Sinne der Energiewende optimiert werden können.

Das Potential der einzelnen Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz scheint gering, jedoch lassen sich bei optimierter Dimensionierung durch die Anwendbarkeit in vielen Objekten der Siedlung große Stückzahlen erreichen. Da es flächendeckende Modernisierungsarbeiten in vermieteten Objekten in der Regel nicht gibt, sollen diese Maßnahmen jedoch nicht in einem Zug umgesetzt werden, sondern nach und nach im Rahmen anstehender Sanierungsarbeiten auf die Siedlung ausgeweitet werden, wenn diese für das jeweilige Objekt zu empfehlen sind. Es wird damit voraussichtlich

nie einen gleichartigen energetischen Zustand aller Gebäude geben. Dies ist bei einer Entwicklung des Energieversorgungskonzeptes zu berücksichtigen.

6.4.2.2 Ansätze zur Verbesserung der Gebäudehülle

Der Gebäudebestand der Margarethenhöhe wurde im 2. Weltkrieg zu ca. 40 % zerstört, jedoch sowohl in dessen baulichen Struktur als auch gestalterischen Qualität annähernd gleich wiederaufgebaut. Der energetische Zustand der Gebäudehülle entspricht damit in großen Teilen noch dem der Bauzeit. Dies beinhaltet ungedämmtes, verputztes Ziegelmauerwerk, teilausgebaute, ungedämmte Dächer und in Einzelfällen Einscheibenverglasung der Fenster. Im Rahmen kontinuierlicher Instandhaltung – früher hauptsächlich durch die Mieter, heute durch die Stiftung – wurden Fenster ausgetauscht, Dächer ausgebaut und gedämmt.

Aufgrund der hohen gestalterischen Qualität der Fassaden kommt eine thermische Ertüchtigung durch eine Außendämmung nicht in Frage. Im Vorhaben wird daher die Möglichkeit einer Innendämmung durch einen Aerogel-Dämmputz als Ergänzung zu den Standardsanierungsmaßnahmen der Stiftung untersucht. Dafür wurden mithilfe der Ergebnisse aus genaueren Bestandsuntersuchungen beispielhafter Gebäude und Laboruntersuchungen zu Materialien und Dämmputzen Simulationsmodelle erstellt, anhand derer für die typischen Konstruktionen unkritische Standardaufbauten entwickelt wurden.

6.4.2.3 Ansätze zur Energieversorgung der Gebäude

Im Rahmen der kontinuierlichen Instandhaltung und bei Mieterwechsel werden bei Bedarf neue Heizungen eingebaut. Dabei werden grundsätzlich Einzellösungen je Wohneinheit zur Beheizung und Warmwasserbereitung vorgesehen. Da dies früher durch die Mieter umgesetzt wurde, liegen für den Bestand nur in Einzelfällen Informationen über Typ und Baujahr vor.

Im Rahmen des Vorhabens wird die Einbindung regenerativer Energien durch Photovoltaik, Solarthermie und Erdwärme gebäudenah überprüft und in Einzelfällen auch umgesetzt. Dies wird durch kleinformatige, thermisch und elektrisch aktivierte Dachsteine realisiert, da es für den Denkmalschutz ausgeschlossen ist, großformatige Paneele auf den Dächern zu montieren. Ergänzt werden diese mit thermischen und elektrischen Speichern und Erdwärmesonden. Mittels thermischer Gebäudesimulation wurden die Wechselwirkungen innerhalb des Systems bei veränderten baulichen Qualitäten untersucht und die einzelnen Komponenten danach dimensioniert.

6.4.2.4 Ansätze zur Energieversorgung des Quartiers

Bisher wird für jedes Objekt in der Margarethenhöhe eine Einzellösung zur Beheizung und Warmwasserversorgung gewählt. Quartierslösungen, wie den Anschluss der Gebäude über ein Wärmenetz an eine gemeinsame Heizzentrale, wurden bisher nicht verfolgt.

Im Rahmen des Vorhabens wird untersucht, ob und wieweit eine Quartierslösung möglich wäre. Dabei wird die Einbindung durch die aktivierten Dachsteine erzeugte Wärme in ein Nahwärmenetz genauso berücksichtigt wie der Bau eines BHKW für die Siedlung. Zu diesem Zweck wurde ein Modell der gesamten Siedlung erstellt, anhand dessen der Einfluss der einzelnen Parameter bei unterschiedlichen Szenarien in den nächsten Jahren simuliert werden können. Die Szenarien berücksichtigen unterschiedliche Sanierungszustände der Gebäude entsprechend einer für die Siedlung üblichen Mieterwechselrate und den damit verbundenen Einbau aktivierter Dachsteine zur thermischen und elektrischen Nutzung von Solarenergie. Durch die Abbildung von Wärme- und Stromspeichern im Modell können diese zur Ermittlung von Residuallasten herangezogen werden. Gleichzeitig wird im Modell der Einsatz von BHKWs, deren Verteilung im Quartier abgebildet und der Betrieb simuliert.

6.4.3 Erkenntnisse aus Planung und Umsetzung

6.4.3.1 Umsetzung in fünf Objekten und Energieversorgungskonzept

Im Rahmen des Vorhabens werden bei fünf Objekten geeignete Maßnahmenpakete umgesetzt. Der Planungsfortschritt am konkreten Gebäude zeigt, dass auch ein auf den ersten Blick umfassendes Konzept aufgrund von Details vor Ort gegebenenfalls angepasst werden muss. Daher werden die Einzelmaßnahmen – Dämmung der Außenwände, aktivierte Dachsteine, elektrische und thermische

Speicher, Erdwärmesonden, Fußbodenheizung, Wärmepumpe, Smart Home – in den fünf Fällen unterschiedlich kombiniert. Was für die Forschung interessante Vergleiche ermöglicht, stellt in der Praxis jedoch zunächst eine weitere Quelle für unbekannte Risiken und erhöhten Planungsaufwand dar. Da die Objekte, wie üblich, durch Mieterwechsel frei sind, liegen sie nicht nebeneinander. Auch erhalten nicht alle Dächer eine Eindeckung mit aktivierten Dachsteinen. Eine Verbindung der Gebäude durch ein Nahwärmenetz wird daher zunächst nicht umgesetzt. Trotzdem bieten die mittels Monitoring vor Ort erfassten Daten aus der Sanierung eine weitere Möglichkeit, das Quartiersmodell zur Energieversorgung zu verifizieren und für einen zukünftigen Ausbau zu optimieren.

6.4.3.2 Positive Erfahrungen aus Bestandsuntersuchung und Planung

Die Erfahrungen aus den Untersuchungen vor Ort, dem Bestandsmonitoring, der Planung und schließlich Umsetzung der Maßnahmen über die verschiedenen Phasen des Verbundvorhabens hinweg haben deutlich gezeigt, dass der Erfolg des Vorhabens maßgeblich von Personen abhängt, die ursprünglich nicht im Fokus standen. Bereits bei der Auswahl typischer Objekte für das Monitoring und dem Einbau der Messtechnik haben die Erfahrung und der gute Kontakt der Margarethe Krupp-Stiftung zu ihren Mietern Widrigkeiten bei den umfangreichen Arbeiten vor Ort wiederholt ausgleichen können. Bei der Planung der konkreten Maßnahmen in den beispielhaften Objekten zeigt sich, dass Kompetenz, Routi-

ne und Engagement der beteiligten Mitarbeiter der Stiftung überhaupt erst eine Umsetzung möglich machen. Im Bestand immer wieder zu erwartende, aber in ihrer Art unvorhergesehene Probleme oder durch die Einzigartigkeit der Komponenten verursachte Verzögerungen wurden durch die Stiftung bisher mit immer neuen konstruktiven Lösungsvorschlägen unterstützt.

6.4.3.3 Unwägbarkeiten aus dem Gebäudebestand

Die Gebäude der Margarethenhöhe sind grundsätzlich in einschaligem, verputzten Mauerwerk aus Vollziegeln ausgeführt. Einzelne Gebäude wurden zweischalig mit Sichtmauerwerk gebaut, einige davon jedoch später zum Witterungsschutz verputzt. Um welche Gebäude es sich auch nach dem Krieg tatsächlich noch handelt, ist nicht bekannt. Durch Wiederaufbauten und Umbauten bis heute sind auch weitere Details der Konstruktionen nicht gleichartig. So wurden beispielsweise bei Untersuchungen in einem Gebäude Fensterstürze sowohl aus Stahl, Holz und Beton vorgefunden. Solche Unterschiede müssen bei einer Dimensionierung der Standard-Sanierungsmaßnahmen berücksichtigt werden, da für eine denkmalrechtliche Genehmigung im Einzelfall geklärt sein muss, dass diese für die Bausubstanz des Denkmals unkritisch sind. Trotz des großen Engagements der Margarethe Krupp-Stiftung und dem wohlwollenden Interesse der Denkmalpflege am Vorhaben erschweren die Gegebenheiten eine zügige und in der Serie kostengünstige Umsetzung.

Durch die starke Durchgrünung des Viertels und die kleinteilige Gestaltung der Dächer mit Gauben, Giebeln und Schornsteinen sind Photovoltaik und Solarthermie bei vielen Objekten nicht sinnvoll einzusetzen. Teilflächen zu belegen, da nur eines von mehreren aneinandergebauten Objekten frei wird, ist nicht wirtschaftlich umzusetzen oder gegebenenfalls gar nicht möglich, wenn das Dach der angrenzenden Gebäude bereits ausgebaut ist. Gleichzeitig lässt die Rücksichtnahme auf denkmalgeschützte Vorgärten und individuelle Nutzung der Gärten durch die Mieter auf den kleinen Grundstücken oftmals keinen Platz für Bohrungen oder den Bau von Wärmenetzen, oder die Zufahrt für Bohrgeräte ist nicht gegeben. Diese Einschränkungen zeigen sich erst in einer genaueren Prüfung der Gegebenheiten vor Ort am einzelnen Objekt und sind auch von der Kooperation der Mieter angrenzender und damit ebenfalls betroffener Objekte abhängig.

6.4.3.4 Empfehlungen für vergleichbare Vorhaben

Die Vielzahl der unterschiedlichen Parameter, die einen Einfluss auf Optimierung und Durchführbarkeit der Maßnahmen vor Ort haben, wird sich bei Bestandsquartieren kaum reduzieren lassen. Die Möglichkeit, sich auf eine einzelne Sanierungskomponente zu beschränken, wurde bereits im Vorfeld des Verbundvorhabens ausgeschlossen, da nicht davon ausgegangen werden konnte, dass einzelne dieser Maßnahmen im denkmalgeschützten Gebäudebestand für eine grundsätzliche Veränderung der Energieversorgung des Quartiers ausreichen würden. Die Prüfungen der Gegebenheiten vor Ort

und die Koordination der vielen Beteiligten bleibt damit in einem vergleichbaren Vorhaben sehr aufwändig.

Um Maßnahmen umzusetzen, die im jeweiligen Quartier oder für die Beteiligten noch unbekannt sind oder grundsätzlich in der Praxis noch nicht oft eingesetzt wurden, empfiehlt es sich, so weit wie möglich mit den vorhandenen Strukturen vor Ort zu arbeiten. Kenntnisse über die vorhandene Bausubstanz oder erprobte Vorgehensweisen sind sehr hilfreich für ein Vorhaben, in dem bereits aufgrund des innovativen Charakters der Maßnahmen mit Unwägbarkeiten noch unbekannter Art gerechnet werden muss. Je größer das Vorhaben ist, desto wichtiger sind eingespielte Abläufe und vorhandene Kontakte der Beteiligten. Dies haben die erfolgreiche Zusammenarbeit mit den Mitarbeitern der Margarethe Krupp-Stiftung und den mit den Objekten vertrauten ausführenden Unternehmen, insbesondere aber auch die seitens der Stiftung gepflegte routinierte und enge Abstimmung mit der Denkmalpflege deutlich gezeigt.

6.4.3.5 Weiterer Forschungsbedarf

Die besonderen Eigentumsverhältnisse auf der Margarethenhöhe haben eine ganzheitliche Betrachtung mit beispielhafter Umsetzung im Quartier möglich gemacht. In diesem Fall gehören der Margarethe Krupp-Stiftung alle 586 Wohnhäuser des Quartiers, die den Kern des Vorhabens bilden. Gleichzeitig ist durch die vergleichsweise kurze Bauzeit von 1909 bis 1933 durch nur einen Architekten ein sehr homogener Bestand vorhanden. Diese Bedingungen

sind bei energetischen Sanierungen im denkmalgeschützten Bestand nicht häufig vorzufinden. In weiteren Forschungsvorhaben sollte daher untersucht werden, welche Maßnahmen und Konzepte sich auf andere Eigentumsverhältnisse und andere bauliche Strukturen im Bestand übertragen lassen, um die Energiewende auch durch solche Quartiere zu unterstützen.

Das Verbundvorhaben wurde und wird von Vielen gestaltet, bearbeitet und unterstützt:

Für die Universität Stuttgart durch Prof. Dr. Harald Garrecht, Dr. Christian Baumert, Christian Blatt, Christiane Ditzen, Luka Lackovic, Simone Reeb, Zaher Ramadan, Lena Teichmann.

Für die Margarethe Krupp-Stiftung durch Michael Flachmann, Thomas Möller, Andreas Schmitt, Tanja Sommerfeld, Tobias Jäger.

Für das GWI durch Jörn Benthin, Frank Burmeister, Annika Heyer, Stefanie Ruppert.

Für die RWTH Aachen durch Prof. Dr. Stefan Heinen, Dr. Ralf Wunderlich, Lukas Lohaus, Leo Rolff, Tobias Zekorn, Michael Hanhart, Prof. Dr. Dirk Müller, Marc Baranski, Thomas Schreiber, Florian Stinner, Xiaoye Cai.

Unser besonderer Dank gilt dem Institut für Denkmalschutz und Denkmalpflege der Stadt Essen, Dr. Petra Beckers und Andrea Richter.

Kontakt-Adresse:

Universität Stuttgart
Institut für Werkstoffe im Bauwesen

Prof. Dr.-Ing. Harald Garrecht
harald.garrecht@iwb.uni-stuttgart.de

Dipl.-Ing. Dipl.-Ing. Architektin Christiane Ditzen
christiane.ditzen@iwb.uni-stuttgart.de



07

VERSORGUNGS-
NETZE



VERSORGUNGS- NETZE

7.1 Einführung und Relevanz

7.2 Aufarbeitung relevanter Ergebnisse der
Wissenschaftlichen Begleitforschung

7.3 Effiziente Kälteversorgung durch intelli-
gent gekoppelte Netze



In diesem Kapitel wird die Bedeutung von Energieversorgungsnetzen untersucht. Hierbei werden Erkenntnisse der Forschungsinitiative Energiewendebauen zusammengetragen und die Relevanz von Netzen im Rahmen der Energiewende sowie für die Flexibilisierung des Energiesystems betrachtet.

7.1 Einführung und Relevanz

Der Klimaschutzplan der Bundesregierung sieht vor, dass Deutschland bis 2050 weitestgehend treibhausgasneutral wird [1]. Dies bedeutet unter anderem die Umstellung der größtenteils auf fossilen Energieträgern basierenden Sektoren der elektrischen Energieversorgung, der Wärmeversorgung und des Verkehrs auf regenerative Energiequellen [2]. Einer solchen Entwicklung müssen auch die historisch gewachsenen Versorgungsnetze, das elektrische Netz, das Gas- und Wärmenetze folgen. Durch die Umstellung auf Erneuerbare Energien (EE) ergeben sich auf dem Gebiet der Versorgungsnetze neben dem wesentlichen Ausbau- auch Umstrukturierungsbedarf.

In der elektrischen Energieversorgung findet eine Umstellung von einer Versorgung aus fossilen Energieträgern und Kernenergie auf die mehrheitliche Nutzung von EE statt. Gegenüber einer zentralen Energiebereitstellung durch Großkraftwerke wird sich damit eine zunehmend über große Flächen verteilte, dezentrale Stromerzeugung einstellen [3]. Der Großteil der regenerativen Erzeugungsanlagen ist auf der Nieder- und der Mittelspannungsebene an das Netz angeschlossen [3]. Diese Anlagen, insbesondere Photovoltaik- und Windenergieanlagen, sollen künftig den Großteil der elektrischen Energie bereitstellen.

Ursprünglich war das elektrische Versorgungsnetz auf die maximale Verbraucherlast und eine relativ konstante Belastung ausgelegt. Nun kommt es jedoch in den verschiedenen Spannungsebenen zunehmend zu Rückspeisungen, welche durch die

dezentrale Verteilung und die fluktuierende Energiebereitstellung charakteristisch Erneuerbarer Energieanlagen verursacht werden [3]. Dadurch drohen Überlastungen von Netzelementen, was nicht nur den Netzausbau bedingt, sondern erfordert auch Anpassungen innerhalb der einzelnen Netzebenen. Des Weiteren erfordert die zunehmende Gewichtung erneuerbarer Energieerzeugungsleistung die Bereitstellung von Reserveleistung zum Ausgleich der Volatilität von EE-Anlagen. Großanlagen kommen hierfür immer weniger in Frage, weil erstens die öffentliche Akzeptanz für den Neubau von konventionellen Anlagen fehlt und zweitens Großanlagen zumeist nicht die nötige Flexibilität aufweisen, die zeitlich und räumlich schwankende Stromerzeugung von EE-Anlagen auszugleichen [4]. Anlagen zur Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) bieten hierfür zum Beispiel Möglichkeiten [4]. Neben weiteren flexiblen und nachhaltigen Energieerzeugungsanlagen können neuartige Ansätze beitragen, die witterungsbedingt schwankende Energiebereitstellung aus erneuerbaren Quellen auszugleichen und das elektrische Versorgungsnetz zu entlasten. Hierzu gehört das sogenannte Demand-Side-Management (DSM), der gezielten Einflussnahme auf die Energieverbrauchsseite zur Anpassung des Energiebedarfs an die erneuerbare Energiebereitstellung. Auch die Sektorenkopplung kann einen wichtigen Beitrag leisten, um das Energiesystem zu flexibilisieren und gleichzeitig dazu beitragen, die Klimaschutzziele insbesondere im Wärme- und Verkehrssektor zu unterstützen.

In der Vergangenheit wurde die Erzeugung elektrischer Energie an die Last angepasst. Entsprechend

wurden große Energieerzeugungsanlagen meist dort gebaut, wo ein hoher Energiebedarf besteht. Viele Untersuchungen zur Entwicklung des künftigen Energiesystems stimmen jedoch darin überein, dass ein Großteil der elektrischen Energiebereitstellung aus Windenergieanlagen stammen wird [5]. Dementsprechend wird es nicht mehr möglich sein, Zentren mit hohem Energiebedarf ortsnah und zentral zu versorgen. Zum einen wird aufgrund unterschiedlicher Faktoren wie beispielsweise geographische Gegebenheiten und der damit verbundenen unterschiedlichen Bereitstellung von Energieträgern ein Großteil der elektrischen Energie in Norddeutschland bereitgestellt werden, während die Lastzentren in Süd- und Mitteldeutschland liegen und den Ausbau des elektrischen Versorgungsnetzes insbesondere von Norden nach Süden unabdingbar macht [6]. Zum anderen erscheint es sinnvoll EE-Anlagen in einem Gebiet zusammenzufassen (z. B. durch Pooling / virtuelle Kraftwerke), um die Prognosefähigkeit der Energiebereitstellung zu verbessern und einen Beitrag zur Systemstabilität und Sicherstellung der Energiequalität zu leisten. Diese Betrachtung lässt sich großräumig ausweiten. Gerade zur Integration der Offshore-Windenergieanlagen und für einen überregionalen Energieausgleich sind Übertragungsnetze notwendig [5]. Auch über Landesgrenzen hinaus existieren Überlegungen zur Versorgung von Lastzentren mit EE-Energie. So wird daran gearbeitet Verbindungen herzustellen, welche Strom aus Wasserkraft von Norwegen nach Deutschland transportieren sollen [5]. Der Bezug von Strom aus Solarenergie aus dem Mittelmeerraum wird betrachtet [5]. Zur Übertragung und

Verteilung insbesondere elektrischer Energie und dem kontinuierlichen Zubau Erneuerbarer Energieanlagen in diesem Sektor im Rahmen der Energiewende ist der Ausbau, Umbau und Ertüchtigung des Übertragungs- und Verteilnetzes unverzichtbar.

Studien zum Ausbau des elektrischen Versorgungsnetzes des BMWi und der dena spiegeln die Notwendigkeit dieser Betrachtungen wider. Ein Großteil der Kosten des künftigen Netzausbaus in Deutschland liegt laut der Ergebnisse verschiedener Studien im Bereich der Hochspannung. Es wird davon ausgegangen, dass ca. 60 % der Kosten des Ausbaus der Niederspannungsnetze durch den Anschluss von Photovoltaikanlagen in Süddeutschland nötig werden, während ca. 70 % der Ausbaukosten des Hochspannungsnetzes durch die Netzintegration von Windenergieanlagen in Nord- und Ostdeutschland bedingt werden [7].

Wird die Energieerzeugung auf fluktuierende, erneuerbare Energiequellen konzentriert, so werden Energiespeicher eine zunehmende Rolle in der Energieversorgung spielen. Zum Ausgleich kurzzeitiger Schwankungen kommen kleinere elektrische Speicher wie Batteriespeicher (Lithium-Ionen, Redox-Flow) in Betracht. Um große Energiemengen zu speichern, kommen bisher fast ausschließlich Pumpspeicherkraftwerke zum Einsatz. Jedoch sind deren Zubaukapazitäten in Deutschland äußerst gering [8].

Wärmenetze sind in Deutschland als lokale Netze (Nah- oder Fernwärmenetz) ausgeführt, die zu meist durch KWK-Anlagen gespeist werden und naheliegende Verbraucher mit Wärme versorgen. Das Gasnetz hat vergleichbar dem elektrischen Versor-

gungsnetz eine ähnliche Struktur. Analog zum elektrischen Netz mit verschiedenen Spannungsebenen arbeitet das Gasnetz mit mehreren Druckstufen zur Energieübertragung und -verteilung.

Eine Möglichkeit zur Nutzung von Synergiepotenzialen zwischen der Energiebereitstellung und -verbrauch über unterschiedliche Energieformen/-trägern hinweg bietet die zuvor bereits erwähnte Sektorenkopplung, die u. a. eine Kopplung der verschiedenen Versorgungsnetze untereinander vorsieht. Das Wärme- und Gasnetz ließe sich beispielsweise durch Kopplungstechnologien mit dem elektrischen Netz verknüpfen, um eine verbesserte Nutzung von Erneuerbaren Energien sowie eine höhere Systemstabilität zu erreichen.

Tritt beispielsweise ein EE-Stromüberschuss auf, der im schlimmsten Fall auf Grund von Netzrestriktionen aberegelt werden muss, kann dieser genutzt werden, um über Elektrolyse synthetischen Wasserstoff und ggf. in einem weiteren Prozess (Sabatier-Prozess) Methan (synthetisches Erdgas) zu produzieren (Power-To-Gas). Das unter Einsatz Erneuerbarer Energien gewonnene synthetische Gas ist CO₂-neutral und kann ins Gasnetz eingespeist, gespeichert und wieder entnommen werden. Besteht hingegen ein Stromengpass kann das zuvor eingespeiste, synthetische Gas beispielsweise in einer KWK-Anlage genutzt werden, um elektrische Energie zur Verfügung stellen, um den Engpass wieder zu schließen, während die dabei anfallende Wärme direkt genutzt, von einem Wärmenetz aufgenommen oder gespeichert werden kann [9].

Auch Wärmepumpen gehören zu Technologien der Sektorenkopplung und können Einsatz finden,

um elektrische Energie aus erneuerbaren Quellen in thermische Energie zu wandeln und diese im Wärmesektor zu nutzen. Somit kann die Sektorenkopplung einen Beitrag leisten, die Energiewende sektorenübergreifend zu unterstützen und fossile Energieträger auch abseits des Stromsektors zu substituieren und energiebedingte CO₂-Emissionen zu reduzieren.

Wird die gesamtheitliche Relevanz von Energieversorgungsnetzen auf ein auf erneuerbaren Energien basierendes Energiesystem betrachtet, lassen sich folgende Leitfragen definieren:

- Sind Versorgungsnetze (Strom-, Thermische- & Gas-Netze) die notwendigen Adern einer auf erneuerbaren Energien basierenden Energieversorgung?
- Welche Bedeutung besitzen Versorgungsnetze (Strom-, Thermische- & Gas-Netze) in einer auf erneuerbaren Energien basierenden Energieversorgungsstruktur?
- Welchen Beitrag können Versorgungsnetze zur Flexibilisierung des Energiesystems und zur Etablierung cross-sektoraler Technologien leisten?

Diese Leitfragen gilt es, in diesem Kapitel genauer zu betrachten. Hierzu werden zunächst Ergebnisse der Arbeiten der Wissenschaftlichen Begleitforschung aufgearbeitet und anschließend ein ausgewähltes Projekt aus dem Themenbereich der Netze hinzugezogen, um die Fragestellungen im Kontext des Projektes zu beantworten.

7.2 Aufarbeitung relevanter Ergebnisse der Wissenschaftlichen Begleitforschung

Innerhalb der Wissenschaftlichen Begleitforschung wurden durch vertiefende Querauswertungen ausgewählte Themen detailliert betrachtet, um hierbei Erkenntnisse, Fragestellungen und Lösungsansätze der Forschungsprojekte auszuwerten. Im nachfolgenden Abschnitt sollen die wichtigsten Erkenntnisse der Querauswertungen „Integration erneuerbarer Energien in Wärmenetze“ sowie „Sektorkopplung“ dargestellt werden.

7.2.1 Integration erneuerbarer Energien in Wärmenetze

2018 betrug der Anteil erneuerbarer Energien am Bruttostromverbrauch 37,8 % [10]. Im Wärmesektor waren es hingegen nur 13,9 % des Endenergieverbrauchs [10]. Um die ambitionierten Ziele der Energiewende erreichen zu können, muss somit vor allem in der Wärmeversorgung ein schnellerer Zuwachs an erneuerbaren Energien erfolgen. Im Vergleich zu Einzelversorgungen bieten insbesondere Wärmenetze die Möglichkeit, Bedarf und Verfügbarkeit von Wärme räumlich und zeitlich auszugleichen. Weiterhin entstehen durch zusammengefasste Leistungs- und Energiebedarfe Skaleneffekte. Der Einsatz sich gegenseitig ergänzender unterschiedlicher Technologien in einer Anlage stellt ein weiteres Vorteil dar [11]. Wärmenetze mit erneuerbaren Energien haben neben umwelttechnischen auch systemische Vorteile, erhöhen die Versorgungssicherheit und können flexibel an veränderte An-

forderungen für die Wärmeversorgung angepasst werden. [12].

Die Wärmewende braucht jedoch eine Anpassung des regulatorischen Rahmens und eine Flexibilisierung der Erzeugung. Zur Integration erneuerbarer Energieträger ist eine weitere Absenkung der Systemtemperaturen erforderlich, die wie in Abbildung 7.2-1 dargestellt, bereits seit längerem ein Trend im Bereich der Wärmenetze darstellt.

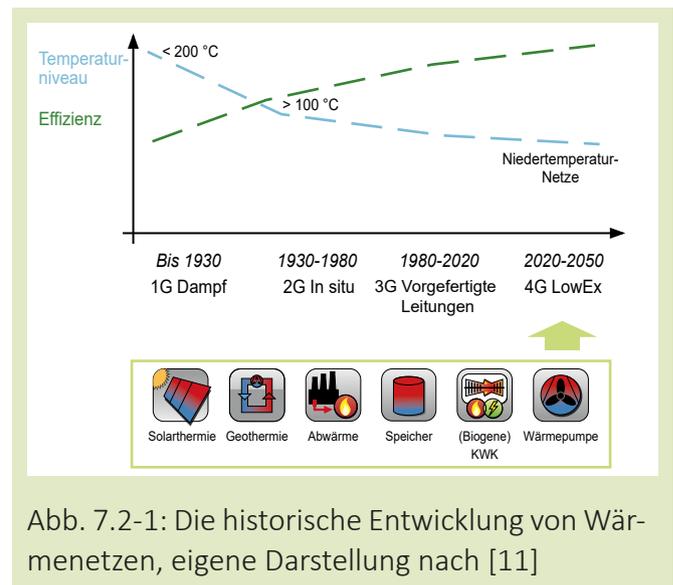


Abb. 7.2-1: Die historische Entwicklung von Wärmenetzen, eigene Darstellung nach [11]

In den Wärmenetzen der ersten Generation wurde die Wärme noch mit Dampf aus Kraftwerken durch zunächst nicht isolierte Leitungen verteilt. In der zweiten Generation wurde die Kraft-Wärme-Kopplung eingeführt [11]. Heutige Wärmenetze werden meist bei Temperaturen unter 100 °C betrieben und nutzen unterschiedliche Wärmequellen. Eine weitere Absenkung der Systemtemperaturen auf unter 70 °C hat den Vorteil, dass auch Wärmequellen auf

niedrigeren Temperaturniveaus, wie Solarthermie oder Abwärme, erschlossen werden können. Angeschlossene Wärmepumpen erzielen höhere Wirkungsgrade, die Wärmeverluste sinken und die Leitungen verschleifen weniger stark [11].

7.2.1.1 Förderprojekte aus dem Bereich Energiewendebauen

Die nachfolgenden Auswertungen umfassen aktuelle Förderprojekte aus dem Forschungsbereich Energiewendebauen, welche sich in einem Projektschwerpunkt mit der Integration von erneuerbaren Energien in Wärmenetze befassen. Zur Ergänzung der Datenbasis wurden zudem Projekte ausgewertet, welche ein Wärmenetz im Projekt betrachten, jedoch keine erneuerbaren Energien in dieses einbinden.

Es konnten insgesamt Fragebögen von 36 Teilprojekten bzw. 35 Gesamtprojekten ausgewertet werden, welche über die ersten drei Befragungsrunden des Online-Fragebogens der Begleitforschung erhoben wurden. Insgesamt liegen damit Angaben zu 50 Wärmenetzen vor. Weitere Informationen zum Fragebogen finden sich in Kapitel 03.

Bei der Auswertung der Technologien zur Wärmeerzeugung wurden die Angaben von Solarthermieanlagen und Wärmepumpen als Nutzung von erneuerbaren Energien kategorisiert. Heizkessel, BHKW sowie Abwärmenutzung wurden hingegen als konventionelle Erzeuger ausgewertet. Weiterhin wurde nur eine Antwort pro Gesamtprojekt berücksichtigt. Falls Antworten von mehreren Teilprojekten dessel-

ben Gesamtprojekts vorlagen, wurden die Antworten zusammengefasst.

7.2.1.2 Wärmeerzeuger

In Abbildung 7.2-2 ist zu erkennen, wie häufig bestimmte Energieträger in den Wärmenetzen genutzt werden. Ausgewertet sind Antworten zu 29 Netzen aus 24 Projekten. In etwa der Hälfte der Netze kommt Erdgas zum Einsatz. Fernwärme wird in 7 Wärmenetzen über eine Übergabestation in das betrachtete Netz eingebunden. Als häufigster erneuerbarer Energieträger kommt die Solarenergie in sechs Netzen zum Einsatz. Strom und Abwärme, deren Ursprung nicht genauer klassifiziert ist, finden sich beide in jeweils 4 Netzen wieder. Alle übrigen Energieträger, von denen nur Holz, Geothermie und Grundwasser als erneuerbar eingestuft sind, werden noch seltener verwendet.

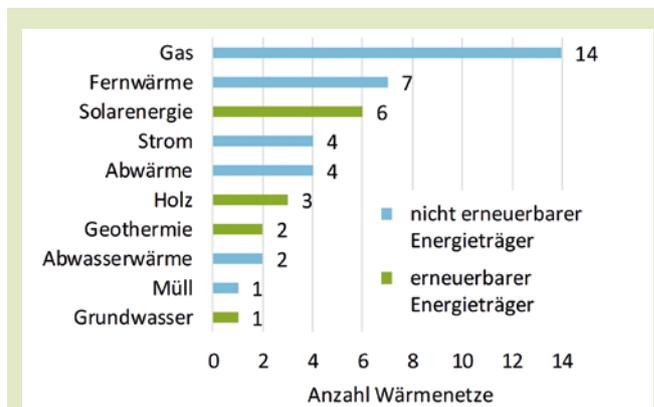


Abb. 7.2-2: Häufigkeit einzelner Energieträger nach Netzen (enthält Mehrfachangaben)

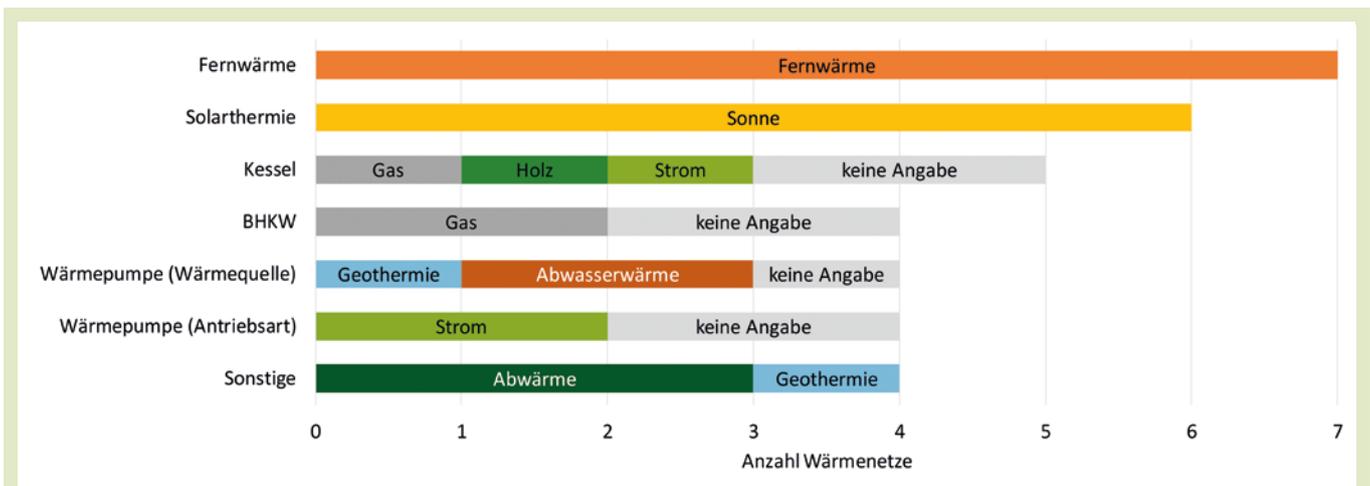


Abb. 7.2-3: Energieträger je Anlagentyp im Netz (enthält Mehrfachangaben)

Abbildung 7.2-3 ordnet die Energieträger den verwendeten Anlagentypen zu. Die Datenbasis zu den Anlagentypen ist etwas geringer, sodass hier nur 26 Netze aus 22 Projekten in die Auswertung einflie-

ßen. Die, mit 7 bzw. 6 Netzen, häufigsten Erzeuger Fernwärme und Solarthermie haben nur einen zugeordneten Energieträger und sind für den Überblick über die Häufigkeit der eingesetzten Anlagen

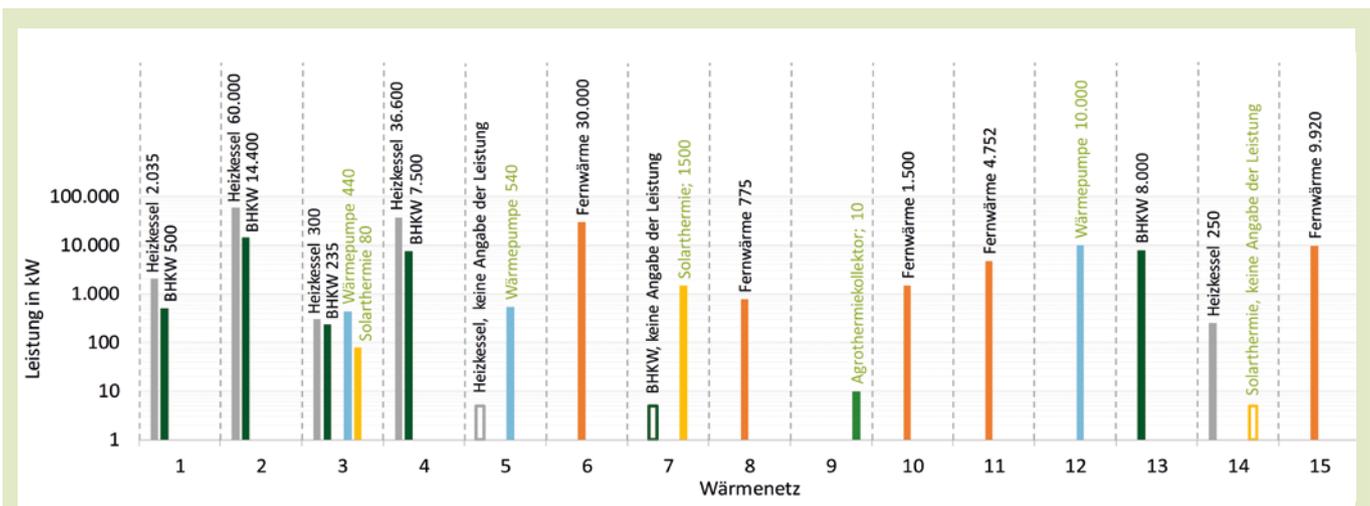


Abb. 7.2-4: Summe der installierten thermischen Leistung je Wärmeerzeugertyp (EE-Wärmeerzeuger in grüner Schrift)

mit aufgeführt. Kessel kommen in fünf Netzen vor und werden mit Erdgas, Holz oder elektrisch betrieben. BHKW und Wärmepumpen werden jeweils in vier Netzen eingesetzt, wobei für zwei Netze Erdgas als Energieträger für die BHKW angegeben wurde. Als Wärmequelle für die Wärmepumpen wurden Geothermie und Abwasser genannt. Weiterhin wurde in zwei Fällen angegeben, dass die Wärmepumpen elektrisch angetrieben werden. Die sonstigen ausgewerteten Anlagen nutzen Abwärme, in einem Fall aus einem Elektrolyseprozess, bzw. Erdwärme, mithilfe eines Agrothermiekollektors.

7.2.1.3 Thermische Leistung der Wärmeerzeuger

In Abbildung 7.2-4 ist für 15 Netze aus 12 Projekten die Gesamtleistung aller Erzeuger je Anlagentyp dargestellt. Die Leistungsbereiche reichen von 10 kW bis 60 MW. In den meisten Netzen kommen mehrere Anlagentypen zum Einsatz, nur Fernwärme wird in allen angegebenen Fällen als einzige Wärmequelle für das jeweilige Netz genutzt. Wärmeerzeuger, die erneuerbare Wärme bereitstellen, werden meist mit konventionellen Erzeugern kombiniert. Bei den ausgewerteten Wärmenetzen sind Erzeuger auf Basis erneuerbarer Energien eher im niedrigen bis mittleren Leistungsbereich von 10 kW bis 10 MW zu verorten. Der Leistungsbereich der konventionellen Erzeuger hingegen liegt in der Tendenz höher und umfasst 235 kW bis 60 MW.

7.2.1.4 Wärmespeicher

In den Netzen kommen auch Wärmespeicher zum Einsatz (Abbildung 7.2-5). Mit 21 von 29 Netzen, die zu insgesamt 21 Projekten gehören, ist die Nutzung eines einzelnen Speichers am weitesten verbreitet. Zwei Speicher kommen in drei Netzen zum Einsatz, fünf und mehr Speicher werden hingegen nur in vier Wärmenetzen eingebunden. Bei Wärmenetzen mit ein oder zwei Speichern werden etwa zu einem Drittel bzw. einem Viertel der Fälle erneuerbare Energien genutzt. Weiterhin werden bei zwei Wärmenetzen bei denen 16 bzw. 38 Speicher angegeben wurden, erneuerbare Energien in das Wärmenetz eingebunden.

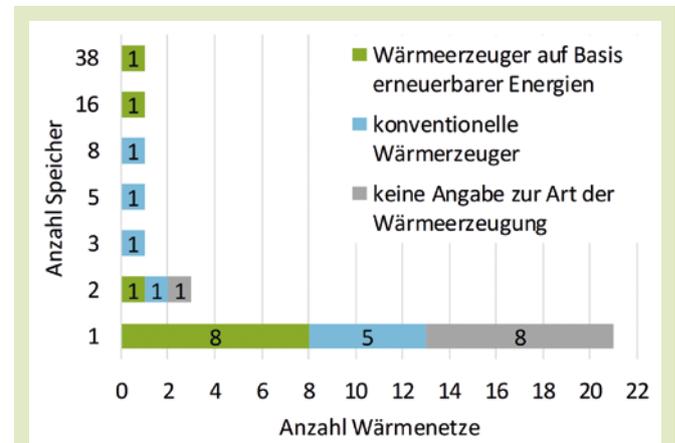


Abb. 7.2-5: Anzahl der Wärmespeicher pro Netz

7.2.1.5 Systemtemperaturen

Ein wichtiger Punkt zur Bewertung von Wärmenetzen ist die Systemtemperatur. In Abbildung 7.2-6 ist die Vor- und Rücklaufemperatur der ausgewerteten Wärmenetze dargestellt, wobei die Sortierung nach der Vorlaufemperatur aufsteigend erfolgt. Zusätzlich enthält die Grafik Informationen zu den verwendeten Anlagentypen samt Energieträger, sofern diese Daten zur Verfügung stehen. Für hohe Temperaturbereiche oberhalb von ca. 80 °C Vorlaufemperatur wird in vielen Fällen Fernwärme aus einem weiteren Wärmenetz zur Wärmebereitstellung genutzt. Für Wärmeerzeuger wie BHKW und Solarthermie liegt die Einspeisetemperatur im überwiegenden Teil der Angaben bei ca. 70 °C. Die

Vorlaufemperaturen der Wärmenetze, in die Wärmepumpen einspeisen, liegen bei allen Angaben im Bereich von ca. 40 °C. Mit ca. 10 °C wird die niedrigste Vorlaufemperatur in einem Wärmenetz gefahren, welches durch einen Agrothermiekollektor gespeist wird. Damit sind die Vorlaufemperaturen der Erzeuger auf Basis von erneuerbaren Energien im niedrigen bis mittleren Temperaturniveau angesiedelt. Konventionelle Erzeuger hingegen decken den Temperaturbereich bis 130 °C ab. In 21 der 34 ausgewerteten Netze (24 Projekte) wird eine gleitende Vorlaufemperatur gefahren.

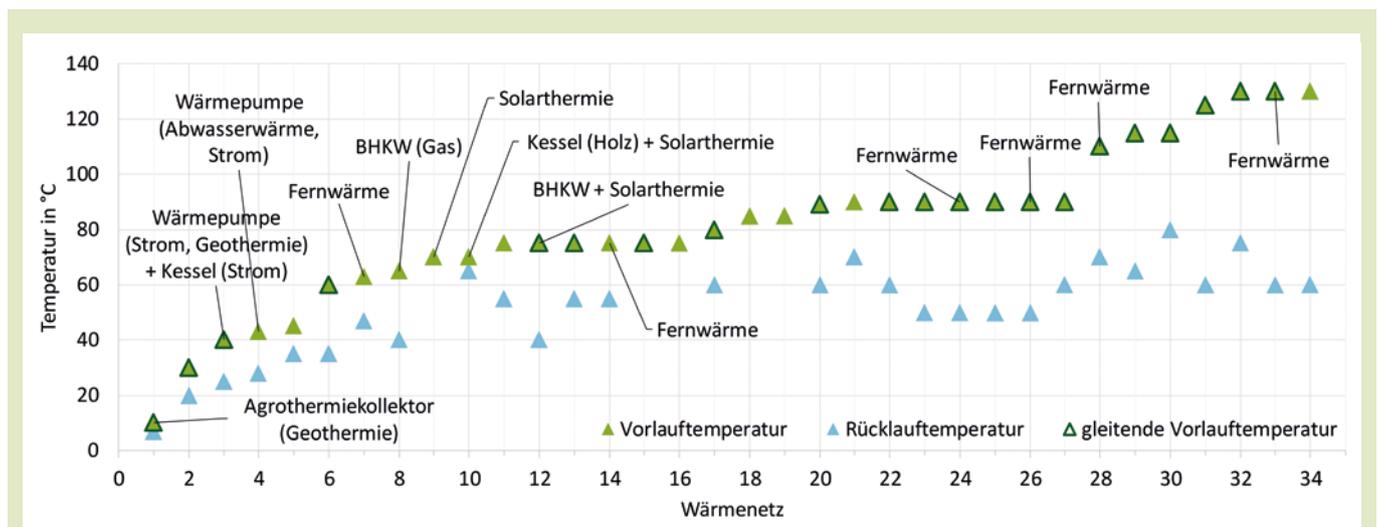


Abb. 7.2-6: Systemtemperaturen in den Wärmenetzen (für Netze ohne Beschriftung liegen keine Informationen zum Anlagentyp vor; der angegebene Energieträger steht gegebenenfalls in Klammern)

7.2.2 Sektorenkopplung

Eine Möglichkeit zur Nutzung von Synergiepotenzialen und zur Erreichung der Klimaschutzziele bietet die Sektorenkopplung, die u. a. eine Kopplung der Versorgungsnetze untereinander vorsieht. Das Wärme- und das Gasnetz ließe sich beispielsweise durch Kopplungstechnologien mit dem elektrischen Netz verknüpfen, um eine höhere Systemsicherheit und eine höhere Nutzung von Erneuerbaren Energien zu ermöglichen. Durch den geplanten Ausbau der erneuerbaren Energien wird auf der einen Seite die Fluktuation bei der Energiebereitstellung deutlich zunehmen. Daraus ergibt sich ebenfalls ein steigender Bedarf an Reservekapazitäten und Systemflexibilität. Auf der anderen Seite stehen zeitweise außerordentliche Überkapazitäten zur Verfügung, die enorme Energiemengen aus erneuerbaren Energiequellen zur Verfügung stellen. Insbesondere im elektrischen Energiesystem muss die Energieerzeugung und der -verbrauch im direkten Einklang sein, stellt eine zentrale Herausforderung bei der Umstellung auf Erneuerbare Energien dar. Im elektrischen Versorgungsnetz können Sektorenkopplungstechnologien Einsatz finden, um Übertagungsspitzen zu glätten und zur Verstetigung der Übertagungsleistung im Versorgungsnetz beizutragen. Des Weiteren kann ein Beitrag geleistet werden Abregelung von EE-Anlagen durch Einspeisemanagementmaßnahmen zu reduzieren. Darüber hinaus bietet die Sektorenkopplung die Möglichkeit auch abseits des Stromsektors in anderen energierelevanten Sektoren (insbesondere der Wärme- und Verkehrssektor), in denen der Ausbau des Anteils erneuerbarer Ener-

gie eine größere Herausforderung darstellt, fossile Energieträger zu substituieren und damit energiebedingte CO₂-Emissionen zu reduzieren.

Der Begriff der Sektorenkopplung wird in vielen Bereichen genutzt, ohne jedoch eine wirklich einheitliche und umfängliche Definition zu besitzen. Daher wurden durch die Wissenschaftliche Begleitforschung bestehende Definitionen untersucht und ein Entwurf einer möglichst umfassenden Definition vorgenommen.

Im Rahmen der Wissenschaftlichen Begleitforschung wird die „Sektorenkopplung“ wie folgt beschrieben. Unter dem Begriff der Sektorenkopplung, bzw. cross-sektoraler Energienutzung, wird die Verknüpfung der Bereiche Strom, Wärme, Gas, Verkehr und Industrie verstanden. Dabei umfasst die Sektorenkopplung sowohl die energetische als auch eine strukturelle Kopplung des Energiesystems.

Die energetische Kopplung der Sektoren bezeichnet das Wandeln bzw. Überführen einer Energieform (z. B. Strom) in eine andere Energieform (z. B. Wärme) bzw. Energieträger (z. B. synthetisches Erdgas), während die strukturelle Sektorenkopplung die technische Kopplung der verschiedenen Infrastrukturen zum Transport und Verteilung der unterschiedlichen Energieformen bzw. Energieträger beinhaltet.

Der Einsatz von Technologien zur Sektorenkopplung ermöglicht die Flexibilisierung des Energiesystems sowie die Nutzung von sektorenübergreifenden (bzw. energieform- und energieträger-übergreifenden) Synergieeffekten zwischen der erneuerbaren Energieerzeugung und dem Energieverbrauch. Damit dient die Sektorenkopplung der Erhöhung der

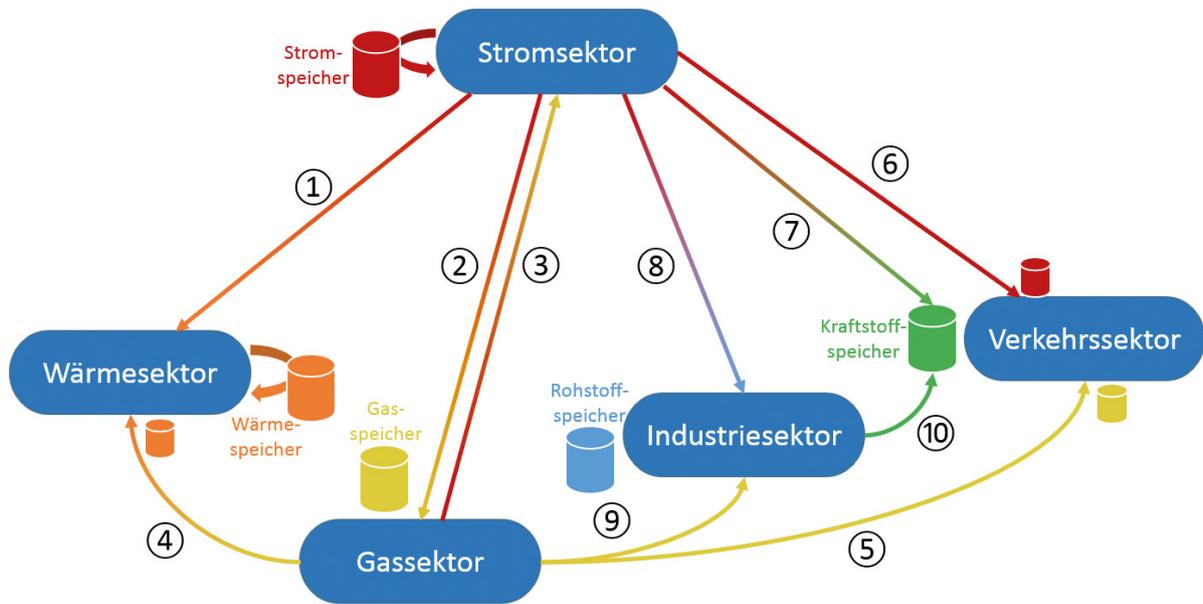


Abb. 7.2-7: Darstellung Sektorenkopplung und Energiespeicher (nach [13])

Integrationsfähigkeit der fluktuierenden Energiebereitstellung aus erneuerbaren Quellen und verfolgt die Zielstellung der sektorenübergreifenden Substitution fossiler Energieträger zur Minimierung energiebedingter CO₂-Emissionen bzw. zur Dekarbonisierung des Energiesystems.

Die angesprochene Kopplung der verschiedenen energierelevanten Sektoren ist in Abbildung 7.2-7 dargestellt.

Die Kopplung der Sektoren erfolgt durch unterschiedliche Technologien unter dem Einsatz verschiedener Speichertechnologien:

- ① Power-To-Heat, Wärmepumpe, Flexible KWK
- ② Einspeichertechnologie Power-To-Gas
- ③ Power-To-Gas als Stromspeicher
- ④ Power-To-Gas als Wärmespeicher
- ⑤ Power-To-Gas als Stromkraftstoff
- ⑥ Elektromobilität
- ⑦ Power-To-Liquid als Stromkraftstoff
- ⑧ Einspeichertechnologie Power-To-Chemicals
- ⑨ Power-To-Gas als Rohstoffspeicher
- ⑩ Power-To-Chemicals als Kraftstoffspeicher

Unter der im Bereich der Sektorenkopplung weit verbreiteten Begrifflichkeit Power-To-X wird die Wandlung elektrischer Energie (Power) in (To) eine beliebige Energieform bzw. -träger (X) verstanden. Somit umfasst Power-To-X technische Möglichkeiten, elektrische Energie in andere, ebenfalls benötigte Energieformen (vorrangig thermische Energie (Wärme, Kälte) und mechanische Energie (u. a. Antrieb, Druckluft)) zu wandeln bzw. in synthetische Energieträger (z. B. Wasserstoff) zu überführen [14]. Wesentliche Power-To-X-Technologien sind Power-To-Heat (P2H), Power-To-Gas (P2G) und Power-To-Liquid (P2L), jedoch kann auch eine Unterscheidung nach dem Verwendungszweck wie beispielsweise bei Power-To-Mobility und Power-To-Fuel vorgenommen werden [15], [16].

Innerhalb der Literatur besteht weitestgehend Konsens, dass die Sektorenkopplung im Allgemeinen die Kopplung der Energiesektoren Strom, Gas und Wärme, unter Verwendung verschiedener Energiewandlungs- und -speichertechnologien umfasst. Allerdings ist eine Einbeziehung bzw. Betrachtung weiterer Sektoren wie Industrie und Verkehr umstritten. Die technisch weitgehend ausgereifte Kopplung der Sektoren Strom und Wärme mittels Power-To-Heat wird in einer Vielzahl von Forschungsprojekten hinsichtlich der Systemintegration untersucht, während weitere Sektorenkopplungsbereiche wie Power-To-Liquid oder Power-To-Chemicals bislang nicht tiefer erforscht wurden und sich die Technologien überwiegend im Prototypenstadium befinden. Auch die Kopplung des Verkehrssektors mit dem Stromsektor mittels Elektrofahrzeugen, insbesondere der Vehicle-To-Grid Ansatz, bietet in vielen

Bereichen wie dem intelligenten Laden (und Entladen), Standardisierung und Batterieentwicklung Forschungsbedarf [14], [17], [18].

Nachdem bereits einige Ergebnisse der Arbeiten der Wissenschaftlichen Begleitforschung zur Themenstellung der Energienetze aufgearbeitet wurden, widmet sich der nachfolgende Abschnitt einem Projekt aus dem Themenbereich der Netze, um so die Fragestellungen im Kontext des Projektes zu beantworten.

Literatur:

- [1] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit, „Klimaschutzplan 2050,“ 01 11 2016. [Online]. Available: <https://www.bmu.de/publikation/klimaschutzplan-2050/>. [Zugriff am 20 01 2020].
- [2] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, „Energiedaten: Gesamtausgabe,“ 08 2019. [Online]. Verfügbar: https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/Energiedaten/energiedaten-gesamt-pdf-grafiken.pdf?__blob=publicationFile&v=40. [Zugriff am 12 01 2020].
- [3] T. Hammerschmidt, Entwicklung und Bewertung effizienter Netzkonzepte für Stromverteilnetze auf der Basis einer systematischen Analyse der Versorgungsaufgaben bis 2030, sierre VERLAG, 2013.
- [4] J. Karl, Dezentrale Energiesysteme: Neue Technologien im liberalisierten Energiemarkt, Oldenbourg: De Gruyter Oldenbourg, 2006.
- [5] M. Günther, Energieeffizienz durch Erneuerbare Energien, Wiesbaden: Springer Verlag, 2015.
- [6] T. Unnerstall, Energiewende verstehen, Berlin: Springer Verlag, 2018.
- [7] J. J. Bürger, Transformationsprozesse und Stromnetzausbau, Berlin: Springer Verlag, 2018.
- [8] K. Kleinknecht, Risiko Energiewende, Berlin: Springer Verlag, 2015.
- [9] Energie Update, „Stabilere Netze: Erzeuger und Verbraucher besser verknüpfen,“ [Online]. Verfügbar: <https://energie-update.de/thema/stabilere-netze/>. [Zugriff am 10 2019].
- [10] Umweltbundesamt, „Erneuerbare Energien in Deutschland. Daten zur Entwicklung im Jahr 2018,“ 2019.
- [11] M. Dr. Pehnt, M. Nast, C. Götz, S. Blömer, A. Barckhausen, D. Schröder, R. Miljes, C. Pottbäcker, H. Breier, C. Nabe, S. Lindner und B. Dannemann, „Kurzstudie zur Umsetzung der Maßnahme „Modellvorhaben erneuerbare Energien in hocheffizienten Niedertemperaturwärmenetzen,“ 2017.
- [12] IRENA, „Renewable Energy in District Heating and Cooling: A Sector Roadmap for REmap,“ International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, 2017.
- [13] M. Sterner, „Bedeutung und Notwendigkeit von sektorenkoppelnden Speichern für die Energiewende,“ BMWi, Berlin, 2016.
- [14] P. Lund , J. Lindgren, J. Mikkola und J. Salpakari, „Review of energy system flexibility measures to enable high levels of variable renewable electricity,“ Elsevier, 2015, pp. 785-807.
- [15] M. Sterner, „Energiewende Hessen,“ 2014. [Online]. Available: https://www.energieland.hessen.de/BFEH/giesen/Prof_Dr_Michael_Sterner_Power_to_X_Technologien_und_Sektorkopplung.pdf. [Zugriff am 02 05 2018].
- [16] J. Blondelle, „European Framework for Power-To-X,“ European Commission, 2016.
- [17] D. M. J. E4tech und D. C. S.-K. Fraunhofer IEE, „DAS GEKOPPELTE ENERGIESYSTEM- Vorschläge für eine optimale Transformation zu einer erneuerbaren und effizienten Energieversorgung,“ Bundesverband Erneuerbarer Energie e.V., Berlin, 2018.
- [18] M. Sterner und I. Stadler, Energiespeicher: Bedarf - Technologien - Integration, Berlin: Springer Vieweg, 2014.

Kontakt:

Institutsteil Angewandte Systemtechnik (AST)
des Fraunhofer IOSB

Samir Kharboutli, M.Sc.
samir.kharboutli@iosb-ast.fraunhofer.de

Dipl.-Ing. (FH) Sebastian Flemming
sebastian.flemming@iosb-ast.fraunhofer.de

Prof. Dr.-Ing. Peter Bretschneider
peter.bretschneider@iosb-ast.fraunhofer.de

Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und
Energietechnik UMSICHT

Dipl.-Ing. Carsten Beier
carsten.beier@umsicht.fraunhofer.de

Dipl.-Ing. Matthias Schnier
matthias.schnier@umsicht.fraunhofer.de

7.3 Effiziente Kälteversorgung durch intelligent gekoppelte Netze

In Gebäuden und Liegenschaften, in denen Kühlbedarfe auftreten, entfällt ein signifikanter Teil des Energiebezugs auf die Erzeugung und Bereitstellung von Kälte [1]. Der stetig wachsende Bedarf und der damit verbundene Mehraufwand an Antriebsenergie für die Kälteerzeugung lassen zunehmend das Ziel einer energiesparenden Kälteversorgung in den Fokus der Anlagenbetreiber rücken. Dabei spielt nicht allein der Aspekt erhöhter Energiekosten eine Rolle. Vielmehr besteht die Notwendigkeit, bereits existierende Kälteversorgungssysteme an die sich wandelnden Rahmenbedingungen des Gesamtenergiesystems anzupassen, das zukünftig auf der Nutzung fluktuierender, erneuerbarer Energie basieren soll. Hierbei finden im Wesentlichen zwei unterschiedliche Zielsetzungen Berücksichtigung. Einerseits wird auf eine möglichst energieeffiziente Kältebereitstellung abgezielt, um Energieeinsparungen zu generieren. Andererseits wird angestrebt, bereits heute die für die Kälteerzeugung notwendige Antriebsenergie aus erneuerbaren Energiequellen zu beziehen, die dann mit möglichst geringen CO₂-Emissionen verbunden ist. Beide Zielsetzungen zu koppeln und ein Optimum hinsichtlich Energieeffizienz und CO₂-Einsparung zu erreichen, stellt das Betriebsmanagement von Kälteversorgungssystemen vor neuartige und komplexe Problemstellungen. Denn für die Umsetzung solcher Versorgungsstrategien ist eine medienübergreifende Betrachtungsweise aller an die Kältebereitstellung gebundener Energieströme – Kälte, Wärme und

Strom – erforderlich. Die Kopplung der unterschiedlichen Energieversorgungsnetze bei gleichzeitiger Nutzung von Energiespeichern stellt hierfür eine notwendige Voraussetzung dar, wobei die physikalische Verschaltung von Energiemedien und Energieniveaus sowie deren Verknüpfung auf Kommunikationsebene zu einem intelligenten Energiesystem als vielversprechender technologischer Lösungsansatz zu sehen ist.

Das durch das BMWi geförderte Vorhaben „Energienetz Berlin Adlershof“ widmet sich den Anforderungen einer zukunftsfähigen und umweltfreundlichen Kälteversorgung [2]. Im Rahmen des Projekts wird ein energiemedienübergreifendes Smart Grid (Abb. 7.3-1) umgesetzt und erprobt, wobei der Aufbau einer flexiblen und umweltfreundlichen Kälteversorgung im Fokus steht. Ziel des Projekts ist es, ein anpassungsfähiges und energieeffizientes Kälte-

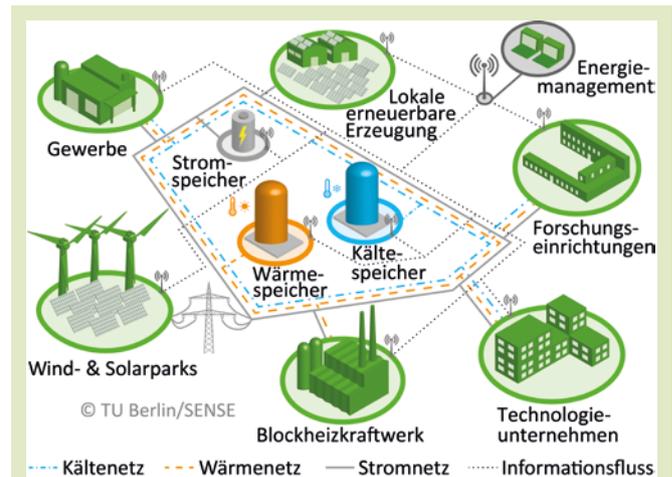


Abb. 7.3-1: Illustration eines energiemedienübergreifenden Smart Grids [© TU Berlin]

netz bei verstärkter Einbindung von erneuerbarem Strom aufzubauen und gleichzeitig eine Technologie zur Nutzung von Abwärme aus dem Kälteerzeugungsprozess zu etablieren.

7.3.1 Projekthintergrund und Problemstellung

Im Fokus des Projekts „Energienetz Berlin Adlershof“ steht das in den 1990er Jahren errichtete Kälteversorgungssystem eines Technologiezentrums in Berlin Adlershof [2]. Es verfügt über drei Kälteerzeugungsstandorte, an denen jeweils mehrere Kompressionskältemaschinen mit einer Gesamtleistung von 3,1 MW installiert sind. Darüber hinaus ist ein Eisspeicher mit einer Speicherkapazität von 8 MWh vorhanden (Abb. 7.3-2), der jedoch über mehrere Jahre hinweg nicht betrieben wurde.

Die installierte Erzeugerkapazität orientiert sich an den Kälteverbräuchen aus der Zeit der Errichtung



Abb. 7.3-2: Eisspeicher des Technologiezentrums [© A. Hanßke]

des Technologiezentrums. Der Kältebedarf unterliegt jedoch starken Schwankungen, die zum einen auf technologische Entwicklungen auf der Verbraucherseite zurückzuführen sind. Zum anderen sieht das Vermarktungskonzept der Liegenschaft einen regelmäßigen Wechsel der Mieterschaft vor, so dass sich die Anforderungen an die Kälteversorgung stetig wandeln.

Ziel des Projekts „Energienetz Berlin Adlershof“ ist es, die Anpassungsfähigkeit des Versorgungssystems an die Bedarfsituation zu erhöhen, um die Effizienz der Kälteversorgung zu verbessern und parallel dazu verstärkt erneuerbaren Strom für die Kälteerzeugung zu nutzen. Darüber hinaus soll die Abwärme, die beim Kälteerzeugungsprozess frei wird, für Trocknungs- und Klimatisierungsprozesse nutzbar gemacht werden.

7.3.2 Konzeption einer energiemedienübergreifenden Netzstruktur

Die Ziele des Vorhabens werden durch die Umsetzung von drei hauptsächlichen Maßnahmen erreicht. Diese umfassen zum einen den Ausbau der Kälteversorgungsstruktur zu einem liegenschaftsübergreifenden Kältenetz mit integriertem Kältespeicher, die Entwicklung eines Energiemanagementsystems für die Kälteversorgung, das die verstärkte Einbindung von erneuerbarem Strom erlaubt, und den Aufbau eines Solenetzes zur Nutzung der Abwärme aus den Kältemaschinen. Dabei ist die Errichtung eines geschlossenen Kälteverbundes die grundlegende Voraussetzung für die Umsetzung aller weiteren Maßnahmen [2].

7.3.2.1 Energieeffiziente Kältebereitstellung durch Netzstrukturen und Speicher

Der Aufbau eines liegenschaftsübergreifenden Kältenetzes setzt zunächst einmal alle Kälteerzeugerstandorte in die Lage, gleichberechtigt Kälte an die im Netz verorteten Verbraucher zu liefern, wobei die drei Erzeugerstandorte sowohl einzeln als auch parallel einspeisen können. Auf diese Weise erfährt das Versorgungssystem einen erheblichen Zuwachs an Flexibilität, denn in Abhängigkeit von der Höhe der auftretenden Kältebedarfe können diese jetzt im Netz gebündelt und durch einen einzelnen Standort versorgt, beziehungsweise gezielt auf mehrere Erzeugerstandorte verteilt werden. Der variable Netzbetrieb macht es möglich, die Kälteerzeuger selbst in Schwachlastzeiten so auszulasten, dass ungünstige Teillastzustände weitestgehend vermieden werden und die Kälte auf diese Weise möglichst energieeffizient erzeugt wird (Abb. 7.3-3).

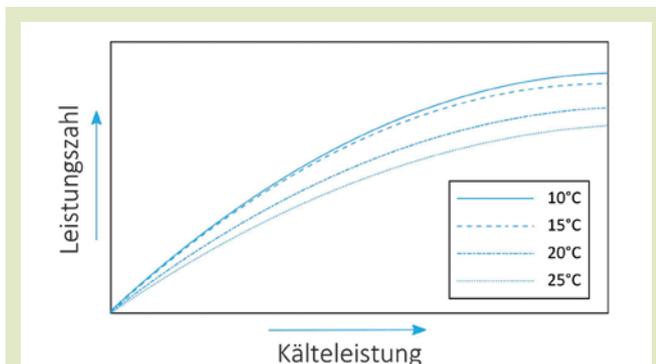


Abb. 7.3-3: Zusammenhang zwischen Effizienz (Leistungszahl) eines Kälteerzeugers, Auslastung und Außentemperatur [© TU Berlin]

Darüber hinaus bildet die installierte Netzstruktur die Voraussetzung für eine hohe Versorgungssicherheit der Kälteverbraucher. Die Flexibilität des Netzes sorgt dafür, dass im Fall einer partiellen Beeinträchtigung, beispielsweise durch Ausfall eines Kälteerzeugers oder auch im Fall geplanter Abschaltungen für Wartungsarbeiten, auf mehrere alternative Versorgungsoptionen zurückgegriffen werden kann. Im Zusammenhang mit dem Ausbau der Kältenetzstruktur des Technologiezentrums wird ein Eisspeicher in das Netz eingebunden. Dieser stellt aufgrund der Einspeicherung latenter Energie im Zusammenhang mit dem Phasenwechsel eine hohe Speicherkapazität zur Verfügung (Abb. 7.3-4). Ziel der Speicherintegration ist es, durch entsprechende Be- und Entladestrategien zusätzliche Effizienz- und Flexibilisierungspotenziale zu erschließen. So wird für den Speicher zunächst eine konventionelle Betriebsstrategie erprobt, die das Beladen während der Nacht vorsieht. Über den Tag hinweg erfolgt die Entladung, wobei die eingespeicherte

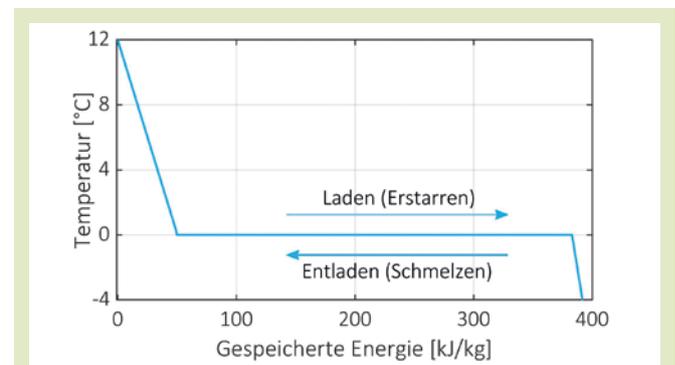


Abb. 7.3-4: Lade- und Entladevorgang eines Eisspeichers [© TU Berlin]

Kälte dann in das Netz eingespeist und den entsprechenden Kälteverbrauchern zur Verfügung gestellt wird. Auf diese Weise werden die Kälteerzeuger in die Lage versetzt, besonders energiesparend Kälte zu erzeugen. Dies liegt unter anderem an den niedrigen Außentemperaturen in der Nacht, die bei gleichen Lastverhältnissen im Vergleich zum Tag zu einer höheren Leistungszahl, also zu einem effizienteren Betrieb der Kälteerzeuger führen (Abb. 7.3-4). Da Temperaturunterschiede zwischen Tag und Nacht ganzjährig auftreten, werden beim Speicherbetrieb mit Nacht-Lademodus jahreszeitunabhängig energetische Vorteile erschlossen. Weitere Effizienzsteigerungen der von der Kälteabnahme entkoppelten Kälteerzeugung resultieren aus der Möglichkeit, die Kältemaschinen in einem betriebsoptimalen Lastfenster betreiben zu können. In Zeiten geringer Kältebedarfe kann demgegenüber eine Direktversorgung mit Kälte zu einem Takten der Kälteerzeuger und hiermit verbundenen Effizienzverlusten führen.

Der Ausbau der Netzstruktur bildet außerdem die Voraussetzung für ein übergreifendes Regelungskonzept, das sowohl die Kälteerzeuger als auch andere wichtige Netzbausteine, wie zum Beispiel Pumpen und Stellarmaturen, nicht nur hydraulisch, sondern auch auf Kommunikationsebene miteinander verknüpft. Das Regelungskonzept bietet verschiedene Optionen für den Betrieb des Kälteverbundes, wobei die Wahl der jeweiligen Betriebsart in Abhängigkeit von der vorherrschenden Lastsituation, also der Höhe des Kältebedarfs und dessen Verortung im Netz, erfolgt. Auf diese Weise wird neben der energiesparenden Kälteerzeugung auch

eine effiziente Kälteverteilung innerhalb des Verbundsystems gesichert.

7.3.2.2 Integration von erneuerbarem Strom durch Energiemanagement

Die Integration des Eisspeichers in das Kältenetz des Technologiezentrums verfolgt darüber hinaus noch ein weiteres Ziel. Durch die Möglichkeit zur Lastverschiebung und der damit verbundenen Flexibilisierung des an die Kälteerzeugung gekoppelten Strombezugs wird die Grundlage für die verstärkte Nutzung von erneuerbarer Energie gelegt.

Die installierten Kompressionskältemaschinen beziehen Strom aus dem Netz des lokalen Stromversorgers. Ein Energiemanagementsystem soll dafür sorgen, dass Kälte dann erzeugt wird, wenn ein hoher Anteil an erneuerbarem und im günstigsten Falle sogar überschüssigem erneuerbarem Strom im Netz vorhanden ist. Das Energiemanagementsystem verfolgt einen energiemedienübergreifenden Ansatz, der sowohl das Stromnetz als auch den Betrieb des Kältenetzes berücksichtigt. Denn die Zielstellung einer verstärkten Integration von erneuerbarem Strom bedingt, dass sich die Kälteerzeugung zukünftig dynamisch an die Volatilität der erneuerbaren Energieträger anpassen muss. Um parallel dazu auch die Effizienz der Kältebereitstellung sichern zu können, muss in gleichem Maße die Betriebscharakteristik der Kälteerzeuger berücksichtigt werden. Ein Modellierungsansatz für die Planung und die Steuerung von energiemedienübergreifenden Smart Grids wurde in [3] veröffentlicht.

Das für das Technologiezentrum geplante System

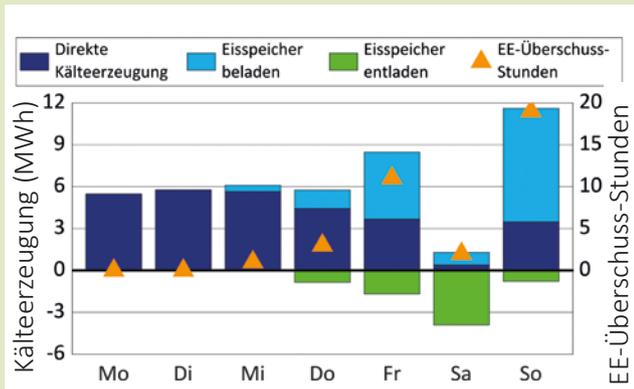


Abb. 7.3-5: Kälteerzeugung und Speichernutzung in Abhängigkeit von der Verfügbarkeit erneuerbarer Energien [© TU Berlin]

soll das Be- und Entladen des Speichers auf der Basis von Prognosen steuern, die beispielsweise die Witterungsverhältnisse, den zukünftigen Kältebedarf der Liegenschaft und die Verfügbarkeit erneuerbaren Stroms berücksichtigen. Dies wird mit Hilfe von Betriebsplänen erfolgen, die dafür sorgen, dass die Kältebedarfe der Verbraucher jederzeit gedeckt werden und sowohl die Kälteerzeuger als auch der Speicher optimal eingesetzt werden.

In Abb. 7.3-5 werden für eine beispielhafte Woche die Kälteerzeugung und die Speichernutzung in Abhängigkeit der Verfügbarkeit von erneuerbaren Energien gezeigt. Freitags und sonntags speisen hier an 11 bzw. 19 Stunden erneuerbare Energieanlagen mehr ein als verbraucht werden kann. Daher wird zu diesen Zeiten der Speicher vornehmlich geladen. Am Samstag kann dann nahezu über den gesamten Tag hinweg der Kältebedarf des Technologiezentrums durch die Entladung des Eisspeichers gedeckt werden.

7.3.2.3 Abwärmennutzung in einem Solenetz

Die bei der Kälteerzeugung entstehende Wärme bleibt zumeist ungenutzt und wird als Abwärme an die Umgebung abgegeben. Weil sich diese Wärmeströme in der Regel auf einem niedrigen Temperaturniveau bewegen und darüber hinaus nicht kontinuierlich verfügbar sind, sind sie für herkömmliche Anwendungen nur schwer erschließbar. Es besteht jedoch die Möglichkeit, solche Niedertemperatur-Abwärme durch Umwandlung in ein thermochemisches Potenzial unter Anwendung von Salzlösungen nutzbar zu machen.

Im Projekt „Energienetz Berlin Adlershof“ wird erstmals ein Solenetz (Abb. 7.3-6) zur Nutzung hygroskopischer Salzlösungen mit allen Komponenten, also Soleregeneration, Speicherung, Transport und mit Anwendungstechnologien erprobt und demonstriert [2].

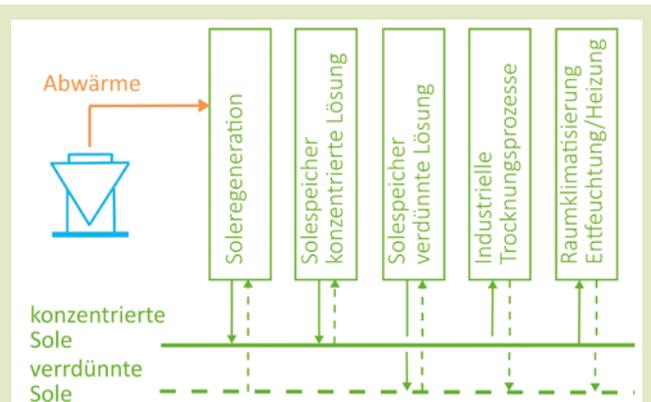


Abb. 7.3-6: Schematische Darstellung des Solenetzes in Berlin Adlershof [© TU Berlin]

Die bei der Beladung des Eisspeichers entstehende Abwärme wird genutzt, um eine verdünnte Salzlösung aufzukonzentrieren und so das hygroskopische Potenzial der Sole zu generieren. Auf diese Weise ist der Soleverbund direkt an den Betrieb des Kältenetzes, und hier konkret an die Be- und Entladezyklen des Eisspeichers, gekoppelt. Die Wärmequelle steht nicht kontinuierlich, sondern nur während der Zeit der Speicherbeladung zur Verfügung. Weil jedoch das hygroskopische Potenzial der Salzlösung nach der Erzeugung zeitlich nahezu unbegrenzt erhalten bleibt, kann die Wärme bei Verfügbarkeit umgewandelt und anschließend in thermo-chemischer Form annähernd verlustfrei gespeichert und transportiert werden. Darüber hinaus besitzt Sole im Vergleich zur herkömmlichen Fernwärme eine etwa dreifache Energiedichte, so dass eine energetisch effiziente Verschiebung von Wärme innerhalb des Solenetzes möglich ist.

Das hygroskopische Potenzial der Salzlösung wird letztlich in Anwendungen genutzt, bei denen ein Entfeuchtungsbedarf besteht, zum Beispiel bei industriellen Trocknungsprozessen und in der Raumklimatisierung. Dabei nimmt die Sole Wasser auf, wird verdünnt und setzt wiederum Wärme frei, die dem jeweiligen Prozess zugutekommt.

Mit der Nutzung von Niedertemperatur-Abwärme, der Möglichkeit verlustarmer Transport- und Lagermöglichkeiten und neuartigen Konzepten zur Senkung des Energiebedarfs in Gebäuden und in der Prozessindustrie bietet das Konzept einen neuen integrierten Baustein für hybride, exergiearme Wärme- und Kältenetze [3].

7.3.3 Fazit

Die Erfahrungen aus dem Vorhaben „Energienetz Berlin Adlershof“ zeigen am Beispiel eines Kälteversorgungssystems aus dem Gewerbesektor, dass Energienetze und insbesondere medienübergreifende Vernetzungskonzepte einen wertvollen Beitrag leisten können, um den Anforderungen einer zukunftsfähigen und nachhaltigen Energieversorgung gerecht zu werden.

Mit dem Aufbau einer vernetzten Versorgungsstruktur in einem Technologiezentrum in Berlin Adlershof konnte eine erhebliche Flexibilisierung des bestehenden Kälteversorgungssystems erreicht und so die grundlegende Voraussetzung für eine effiziente Kälteerzeugung und -verteilung geschaffen werden. Das Kältenetz stellt dabei einerseits die Verknüpfung zwischen Kälteerzeugern und -verbrauchern her und erlaubt auf diesem Wege die optimale Anpassung der Kältebereitstellung an den Bedarf. Andererseits bietet es die Möglichkeit, Speicher zu integrieren und so beide Ebenen gezielt zu entkoppeln, um zusätzliche Effizienzpotenziale zu erschließen. Darüber hinaus ermöglicht das Netz variable Betriebsoptionen, die die Deckung der im Netz auftretenden Kältebedarfe dauerhaft sicherstellen.

Das energiemedienübergreifende Vernetzungskonzept wirkt in zwei unterschiedliche Richtungen. Zum einen wird die Kälteerzeugung an die Verfügbarkeit von Strom aus erneuerbaren Energiequellen gekoppelt, so dass die mit der Kältebereitstellung verbundenen CO₂-Emissionen möglichst gering gehalten werden. Und zum anderen werden durch die

Verknüpfung von Kältenetz sowie Soletechnologie zusätzliche und bisher ungenutzte energetische Potenziale erschlossen, die mit einer Reduktion des Gesamtenergiebedarfs einhergehen.

Eine der wesentlichsten Herausforderungen einer auf erneuerbaren Energien basierenden Versorgung ist die fluktuierende Verfügbarkeit der Energieträger. Hier bieten Netzstrukturen die Möglichkeit, Energiespeicher zu integrieren und auf diesem Wege zeitliche Diskrepanzen zwischen Dargebot und Energienachfrage zu kompensieren. Andererseits ist davon auszugehen, dass Speicherkapazitäten auch in Zukunft nicht unbegrenzt zur Verfügung stehen. Energienetze, die ein hohes Maß an Flexibilität, sowohl auf der Versorgungs- als auch auf der Verbrauchsebene ermöglichen, und auf diesem Wege eine effiziente Energiewandlung und -übertragung, sowie die Erschließung bisher ungenutzter Potenziale sicherstellen können, werden deshalb von immenser Bedeutung für die Stabilität der zukünftigen Energieversorgung sein.

Literatur:

- [1] P. Puls, S. Linhardt und R. Öchsner, „Entwicklung von Betriebsstrategien zur Verbesserung der Effizienz von Kälteversorgungssystemen mit thermischen Speichern,“ Nachhaltige Energieversorgung und Integration von Speichern, 2015.
- [2] S. Bschorer, R. Buchholz, A. Hanßke, S. Langemeyer, C. Petermann und F. Rohde, „Energienetz Berlin Adlershof: Schlussbericht,“ Technische Universität Berlin, Berlin, 2019.
- [3] S. Bschorer, M. Kuschke und K. Strunz, „Object-oriented Modeling for Planning and Control of Multi-energy Systems,“ CSEE Journal of Power and Energy Systems, Bd. 5, Nr. 3, pp. 355-364, September 2019.

Kontakt:

Technische Universität Berlin

FG Maschinen- und Energieanlagentechnik

Dipl.-Ing. Anja Hanßke

anja.hansske@mailbox.tu-berlin.de

FG Energieversorgungsnetze und Integration

Erneuerbarer Energien

Stefan Bschorer, M.Sc.

stefan.bschorer@tu-berlin.de

08



NEUE
TECHNOLOGIEN



NEUE TECHNOLOGIEN

8.1 Technologien in Gebäuden und Quartieren

8.2 Bautechnische Innovation in der Forschung

8.3 Anlagentechnische Innovationen in der Forschung

8.4 Zusammenfassung

8.5 Multifunktionale Betonfertigteilelemente mit schaltbarer Vakuumdämmung

8.6 Prädiktive Regelstrategien für netzdienlichen Betrieb von Wärmepumpen

8.7 Solare Wärmenetze mit saisonalen Multifunktionswärmespeichern



Seit vielen Jahren fördert die Bundesregierung innovative Technologieprojekte im Quartiers- und Gebäudesektor. Im Rahmen der Forschung werden sowohl bautechnische als auch anlagentechnische Komponenten optimiert. In diesem Kapitel werden die aktuell beforschten Technologien unter Berücksichtigung folgender Fragen vorgestellt: Was sind die Herausforderungen bei der Entwicklung neuer Technologien? Welche Hemmnisse können auf dem Weg zur Markteinführung dieser Technologien in Deutschland im Weg stehen? Diese Fragen werden im Folgenden diskutiert und beantwortet.

8.1 Technologien in Gebäuden und Quartieren

Technologieentwicklungen und -innovationen liefern einen wichtigen Beitrag zur Erreichung der Klimaschutzziele. Im Rahmen der Förderinitiative „Energie in Gebäuden und Quartieren“ werden ebenfalls Technologien weiterentwickelt sowie einzelne Komponenten zur Steigerung der Energieeffizienz optimiert.

Nachfolgend wird ein Überblick über die verschiedenen Technologieentwicklungsbereiche sowie die neu- oder weiterentwickelten Technologien, die im Rahmen der Förderinitiative bearbeitet werden, gegeben. Hierbei wird der derzeitige Forschungsstand von Technologien im Gebäude- und Quartierssektor mit den Schwerpunkten bautechnische und anlagentechnische Komponenten detailliert betrachtet. In den beiden Schwerpunkten werden die Komponenten, die in der aktuellen Forschungslandschaft von besonderer Bedeutung sind, identifiziert und einzeln diskutiert. Als Datengrundlage werden die Ergebnisse der 3. Fragebogenphase der Wissenschaftlichen Begleitforschung EWB (siehe Kapitel 03) verwendet.

8.2 Bautechnische Innovation in der Forschung

95 Projekte der Forschungsinitiative untersuchen bautechnische Komponenten. Diese können in die Kategorien Dach, tragende Strukturen, Komponenten für Wärmeschutz & Dämmung, Fenster & Fassade, aktive & adaptive Bauteile, Beleuchtung, Sonnenschutz, sonstige Baustoffe & Materialien

und Bauverfahrenstechnik eingeteilt werden. Wie in Abbildung 8.2-1 dargestellt, liegt der Fokus der Forschungsprojekte vorwiegend auf den Bereichen aktive & adaptive Bauteile, Komponenten für Wärmeschutz & Dämmung sowie Fenster & Fassaden.

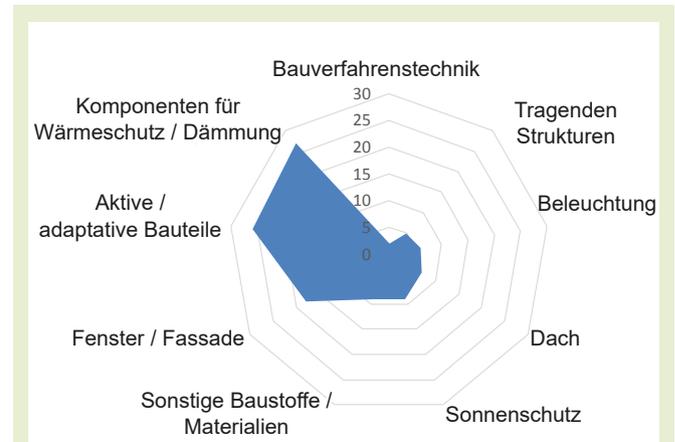


Abb. 8.2-1: Gegenüberstellung der baulichen Komponenten im Rahmen der Förderinitiative

8.2.1 Komponenten für Dämmung und Wärmeschutz

In den Projekten mit dem Forschungsschwerpunkt Wärmeschutz ist die Innendämmung die am häufigsten untersuchte Dämmvariante. Die Verwendung von Innendämmung eignet sich insbesondere, wenn eine Dämmung im äußeren Bereich wegen fehlender Grenzabstände zu den Nachbargebäuden nicht möglich ist, das äußere Erscheinungsbild der Fassade unverändert bleiben muss und keine Außendämmung angebracht werden darf [1]. Die Innendämmung wird in der Forschung intensiv betrachtet, um die aktuellen Nachteile und Probleme

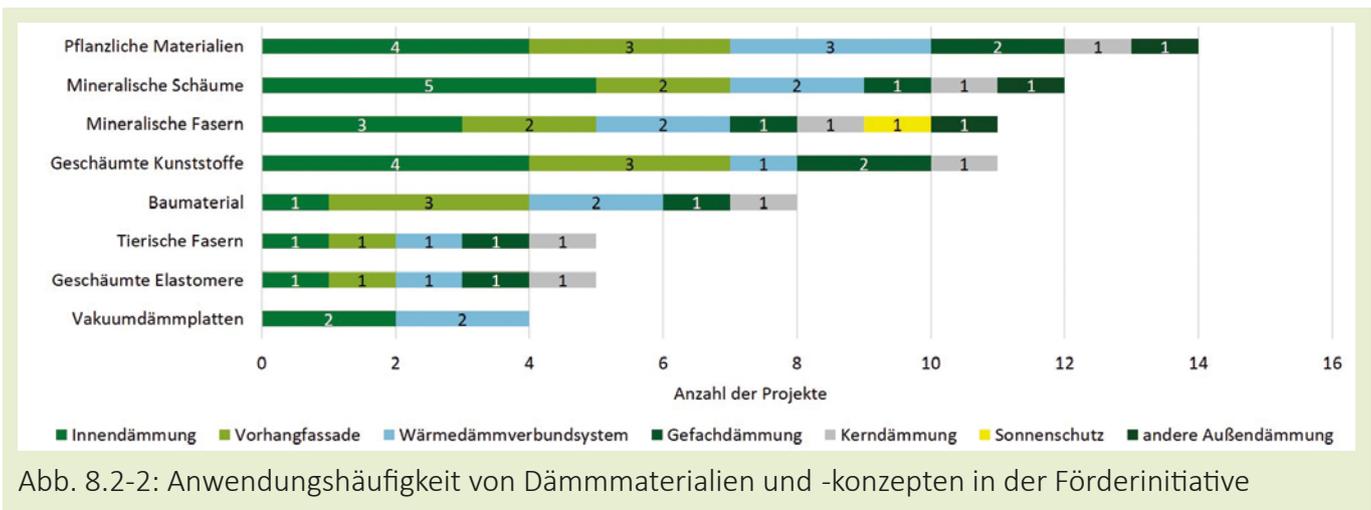


Abb. 8.2-2: Anwendungshäufigkeit von Dämmmaterialien und -konzepten in der Förderinitiative

me, wie bspw. die Verringerung der Wohnfläche oder eine mögliche Freisetzung giftiger Gase im Brandfall brennbarer Dämmstoffe, zu reduzieren. Zur Analyse der Anwendungsmöglichkeiten von Innendämmung werden in einem Projekt geeignete Dämmmaterialien für verschiedene Anwendungsfälle verglichen und getestet. In drei weiteren Projekten werden Dämmmaterialien zur Anwendung im Innenbereich weiterentwickelt. Um eine möglichst hohe Aufwertung der wärmeübertragenden Umfassungsfläche zu erreichen, werden in den Projekten leichte keramische Hybridbaustoffe erforscht, die gute Dämmeigenschaften bei geringem Eigengewicht aufweisen. Diese nicht brennbaren, anorganischen Hybridbaustoffe bestehen aus einer Kombination aus gebranntem Keramikschaum mit einer geringen Wärmeleitfähigkeit (0,045 W/(mK)) und einem nichtbrennbaren Dämmstoff mit einer sehr niedrigen Wärmeleitfähigkeit (0,035 W/(mK)). Zudem wird in einem Forschungsvorhaben ein dünn-schichtiger und spritzbarer Dämmputz auf

Basis von nachwachsenden Rohstoffen entwickelt. Ein weiteres Projekt erforscht einen Dämmstoff mit hoher Porosität und einem dadurch hohen Wasseraufnahme- und Wassertransportvermögen für die Innendämmung bei Baudenkmälern.

In den Bautechnologieprojekten, die Dämmmaterialien weiterentwickeln, werden größtenteils nachhaltige Dämmstoffe wie pflanzliche Materialien, mineralische Schäume und Fasern untersucht. Synthetische Dämmstoffe sind dagegen weniger umweltfreundlich, aber kostengünstiger, und werden bei ca. 10 % der Bautechnologieprojekte erforscht und weiterentwickelt. Vakuuminulationspaneel, die bei gleichem Dämmeffekt im Vergleich zu herkömmlichen Dämmstoffen eine 5- bis 10-mal dünnere Schichtstärke aufweisen, werden in vier Projekten erforscht [2]. Abbildung 8.2-2 zeigt eine Übersicht der Dämmmaterialien und -konzepte in den Forschungsprojekten.

8.2.2 Aktive und adaptive Bauteile

Unter aktiven und adaptiven Bauteilen wird in der Praxis häufig die thermische Bauteilaktivierung (BTA) verstanden. Bei der BTA kann die Gebäudemasse zur Heizung und Kühlung aktiviert werden, indem Rohrleitungen in Massivdecken, Massivwänden oder Bodenplatten verlegt und vom Heiz- bzw. Kühlmedium durchflossen werden. Die BTA wird in sieben Projekten verwendet und dabei in unterschiedlichen Bauteilen wie Decken, Außen- und Innenwänden eingesetzt. Die einzelnen Forschungsprojekte der BTA beschäftigen sich mit der (Weiter-)Entwicklung verschiedener Materialien. Es werden bspw. Phasenwechselmaterialien mit hoher Wärmekapazität als Kühlmedium entwickelt oder Ultrahochleistungsbeton zur Gestaltung durchströmbarer Bauteile als Alternative zu konventionellen BTA-Systemen erforscht, die durch eine Integration von Rohren in den Bauteilen die Raumtemperatur regulieren. Zudem beschäftigt sich ein Projekt mit der Weiterentwicklung von Wärmepumpen als Low-Exergie-Wärmeerzeuger für das BTA-System. Außer der BTA gibt es in den Forschungsprojekten ein weites Spektrum an Konzepten, mit denen die Bauelemente aktiv oder adaptiv gestaltet werden können. In neun Projekten wird die Strategie zur aktiven Solarenergienutzung durch Solarkollektoren oder Photovoltaikanlagen erforscht. Hierbei werden unterschiedliche innovative Ansätze, z. B. Absorber mit thermochromatischer Schichtung zur Vermeidung der Degradation der Solarflüssigkeit bei Überhitzung, untersucht. Ein weiteres Beispiel ist die Entwicklung von photovoltaikthermischen

Kollektoren mit der Funktion gleichzeitig zur erneuerbaren Stromerzeugung und als Wärmequelle für Wärmepumpen zu fungieren. Zudem werden Hybriddachziegel zur Erzeugung thermischer und elektrischer Energie bei Solarstrahlung und (semi-)transparente organische Photovoltaik für lokale Stromerzeugung in transparenten und opaken Bauteilen unter Betrachtung der ästhetischen Anforderungen erforscht.

Baukomponenten, deren Eigenschaften an die dynamische Umgebung und den Heiz- sowie Kühlbedarf des Gebäudes aktiv oder durch Regelung passiv angepasst werden können, werden ebenfalls weiterentwickelt. Hierzu gehören textile Fassadenkomponenten mit schaltbaren Transmissionsgraden und winkelselektiven Eigenschaften. Des Weiteren werden Fassadensysteme mit integrierter schaltbarer Wärmedämmung und Sonnenschutz mit selektiver Beschichtung entwickelt. Mit diesen angepassten Bauelementen kann die Gebäudehülle solare Einstrahlung flexibel absorbieren oder transmittieren. So kann die Gebäudemasse unterschiedliches Aufheizungs- und Abkühlungsverhalten von Tag zu Nacht bzw. von Winter zu Sommer aufweisen. Die Heiz- und Kühllast des Gebäudes kann bei gleichzeitiger optimaler Nutzung des Tageslichts minimiert werden.

8.2.3 Fenster

Für ein durchschnittliches Einfamilienhaus in Deutschland mit einer Fassadenfläche von 120 m², einem zweischaligen Mauerwerk mit Luftschicht und einer 20 m²-Fensterfläche mit Doppelverglasung werden repräsentativ die Wärmeverluste erhoben. Abhängig von der thermischen Qualität der wärmeübertragenden Umfassungsfläche und der Effizienz des Wärmeerzeugers kann für dieses Gebäude bis zu 30 % der Heizenergie im Winter über die Fassade und 12 % über die Fensterfläche verloren gehen. Für dieses durchschnittliche Einfamilienhaus geht pro m² Fensterfläche 2,4-mal mehr Wärme als über die Fassadenfläche verloren [3]. Daher kann bspw. ein Fensteraustausch mit einem niedrigeren Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Wert) zu deutlichen Energieeinsparungen führen.

Laut Angaben der befragten Projekte wird am häufigsten die in der Praxis übliche Zwei- bzw. Dreifach-Wärmeschutzverglasung, die der Anforderung der EnEV entspricht, in den Umsetzungsvorhaben verwendet. Diese werden sowohl als Teil von aktiven Bauelementen weiterentwickelt, als auch als Maßnahme zur Gestaltung eines energieeffizienten Gebäudekomplexes eingesetzt. Zudem findet die Verwendung von Wärmedämmglas mit Edelgasfüllung bei der Sanierung von Wohnquartieren Anwendung.

Neben der Wärmedämmung ist der Sonnenschutz zur Vermeidung der Überhitzung des Innenraums ein weiteres wichtiges Element bei der Gestaltung der transparenten Fläche des Gebäudes. Der Sonnenschutz wird in der Forschung über verschiede-

ne Wege umgesetzt und weiterentwickelt. Die Reduzierung der ungewünschten solaren Einträge ins Gebäudeinnere kann bspw. durch Glas mit Sonder-eigenschaften (wie elektrochromes Glas mit schaltbaren Lichttransmissionseigenschaften) oder durch Sonnenschutzglas mit selektiver Lichtdurchlässigkeit sowie durch Sonnenschutzelemente am/im Fenster (z. B. durch ansteuerbare Jalousien) erfolgen.

Weitere Forschungsschwerpunkte liegen in der Optimierung des Tageslichteintrags ins Rauminnere durch Tageslichtlenkung, sowie in der Integration von dezentralen Lüftungselementen in Fensterrahmen.

8.3 Anlagentechnische Innovationen in der Forschung

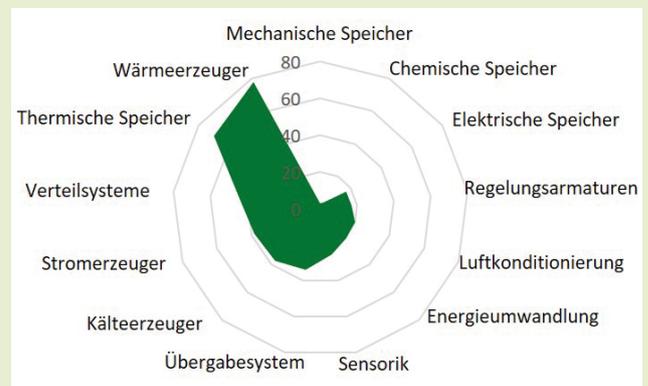


Abb. 8.3-1: Aufteilung des Untersuchungsgegenstandes im Bereich der anlagentechnischen Komponenten- und Systemkategorien in der Förderinitiative

Im Bereich der Anlagentechnik können 133 Projekte identifiziert werden, die in 13 anlagentechnische Komponenten- oder Systemkategorien (siehe Ab-

bildung 8.3-1) eingeteilt werden können. Wärmeerzeuger und thermische Speicher haben aktuell die höchste Präsenz in diesem Forschungsschwerpunkt.

8.3.1 Wärmeerzeuger

77 Technologieprojekte forschen im Bereich der Wärmeerzeuger mit den Zielen einer CO₂-Emissionsminderung, Energieeffizienzsteigerung und/oder Betriebsoptimierung. Die verschiedenen Wärmequellen und -erzeuger in diesen Projekten sind in Abbildung 8.3-2 zusammengefasst.

Der Fokus der aktuellen Forschungstätigkeiten in diesem Bereich liegt auf den Wärmepumpen; daher wird die Wärmepumpe im Folgenden als repräsentative Technologie zur Wärmeerzeugung näher betrachtet. Die Nutzung von Niedertemperatur-Umgebungs-wärme durch Wärmepumpen ermöglicht eine Low-Exergie-Wärmeversorgung. Die Wärmepumpe hat, durch ihren vorwiegend strombasierten Be-

trieb, der zunehmend auf erneuerbaren Energien (2018 über 37 % [4]) basiert, ein hohes CO₂-Reduktionspotenzial und ist somit ein wichtiger technologischer Baustein für die Energiewende. Ein weiterer Vorteil der Elektrifizierung der Wärmeerzeugung durch Wärmepumpen ist, dass die strombasierten Wärmeerzeuger in Zukunft durch einen netzdienlichen Betrieb zur elektrischen Laststeuerung (Demand Response) genutzt werden können.

Laut Angaben des Bundesverbands der Deutschen Heizungsindustrie (BDH) sind Wärmepumpen, mit einer Absatzzahl von über 84.100 Stück und einem Marktanteil von 11,5 % im Jahr 2018, nach dem Gas-Brennwertkessel die zweithäufigste Heizungs-technologie [5]. Besonders im Neubaubereich werden immer häufiger Wärmepumpen eingesetzt. Die Daten des Statistischen Bundesamtes zeigen, dass Wärmepumpen in etwa 41 % der neuen Wohngebäude im Jahr 2018 als Heiztechnologie eingesetzt wurden [6].

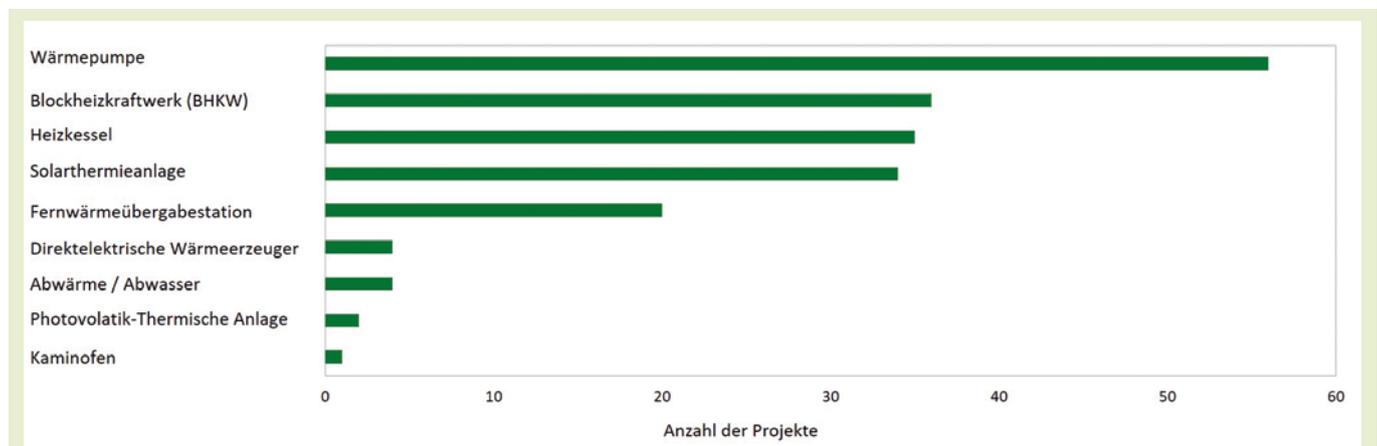


Abb. 8.3-2: Im Rahmen der Förderinitiative betrachtete Wärmequellen und -erzeuger

Die vorhandene Tiefenbohrung *Wärmepumpenanwendungen in Forschung und Praxis der Wissenschaftlichen Begleitforschung* teilt die vorhandenen Forschungsprojekte mit dem Fokus auf Wärmepumpentechnologien in die vier Ebenen Materialien, Komponenten, Anlagen und Gesamtsysteme ein. In der Projektgruppe Materialien für Wärmepumpen beschäftigen sich vier Projekte mit der Entwicklung von Adsorptions-, Phasenwechsel- sowie Hinterfüll- und Sondenmaterialien. Untersuchungsschwerpunkte von zehn Projekten der Projektkategorie Komponenten sind die effektive Bündelung und Umwandlung der solaren Energie in Wärme, sowie die Optimierung von verlustarmen Wärmeübertragern für Wärmepumpen. Diese Komponenten können bspw. photovoltaik-thermische Kollektoren und kompakte Wärmeübertrager mit sehr guten Wärmeübergangseigenschaften sein. Bei Projekten auf Anlagenebene wird der Schwerpunkt auf Wärmepumpen für Industrieprozesse gelegt. Hierzu werden Absorptions- und Hochtemperaturwärmepumpen betrachtet. Fast 60 % der Projekte konzentrieren sich auf Gesamtsysteme. Dabei werden neben der energieoptimierten Energieversorgung von Wärmepumpen-, Gebäude-, Netz- und Quartierssystemen auch die Kombination von Wärmepumpen mit anderen anlagentechnischen Komponenten erforscht.

Um die Verbindungen zwischen Wärmepumpen und anderen anlagentechnischen Komponenten aus den Bereichen Wärme-, Strom-, sowie Kälteerzeuger und Speicher besser beschreiben zu können, wird die Nennungshäufigkeit von Wärmepumpen zusammen mit einer anderen Komponente unter-

sucht. Die Analyse basiert auf den aufbereiteten Informationen aus der 3. Fragebogenrunde.

Als Wärmeerzeuger werden Solarthermieanlagen häufig in Kombination mit Wärmepumpen eingesetzt, um die thermische Umweltenergie der Solarkollektoren auf ein höheres Temperaturniveau zu bringen, und dadurch die Energieeffizienz von Wärmepumpen zu erhöhen. Ergänzend werden Energiekonzepte mit einer Kombination aus Wärmepumpen und Gasbrennwertkessel oder Blockheizkraftwerken betrachtet. Eine Kombination von Fernwärme und Wärmepumpen wird nur in Ausnahmefällen angewandt.

In Projekten mit dem Forschungsschwerpunkt Kältebedarf werden Kompressionskälteanlagen häufiger als andere Kälteanlagen, wie bspw. Absorptions- bzw. Adsorptionskältemaschinen, genutzt. Da Wärmepumpen durch die Installation eines Vierwegeventils und bei der Verwendung geeigneter Arbeitsmittel im Sommer zur Raumkühlung angewendet werden können, wird das Konzept von reversiblen Wärmepumpen in 12 Projekten bei der Entwicklung von unterschiedlichen Systemlösungen (bspw. nachhaltige Energieversorgung auf dem Campus, netzdienliche Betriebsführungsstrategien für Gebäude im Gewerbe-, Handel- und Dienstleistungssektor und effiziente sowie erneuerbare Gestaltung von Subnetzen) untersucht.

Der von Wärmepumpen als Antriebsenergie benötigte Strom kann von Photovoltaikanlagen erzeugt werden. Die dadurch verwirklichte Kopplung des Wärme- und Stromsektors wird in 25 Projekten zur Erreichung verschiedener Ziele – wie die Konzeption von All-Electricity-Technologiequartieren und

die Gestaltung von netzdienlichen Gebäudeenergiekonzepten – weiterentwickelt. Zur Speicherung von überschüssiger Wärme und Kälte werden am häufigsten Wasserspeicher gemeinsam mit Wärmepumpen in den Forschungsprojekten eingesetzt.

8.3.2 Energiespeicher

Im Zuge der angestrebten Dekarbonisierung sowie der voranschreitenden Kopplung der Energiesektoren werden Speicher laut verschiedener Studien zukünftig eine wichtige Rolle im Energiesystem spielen [7], [8]. Nach einer Marktanalyse des Bundesverbands Energiespeicher nimmt der Umsatz der Energiespeicherbranche in Deutschland seit 2016 stetig zu [8]. Das Marktvolumen von Speichertechnologien wird in Deutschland voraussichtlich eine Höhe von 13,2 Milliarden Euro im Jahr 2025 erreichen [9]. Die Energiespeicher können nach der gespeicher-

ten Energieform differenziert und in die Kategorien thermische, chemische, elektrische und mechanische Speicher eingeteilt werden. Zusätzlich können die Energiespeicher nach Speicherkapazität und Speicherdauer unterschieden werden. Durch die Vielfalt von Energieformen, Speicherdauern und Speicherkapazitäten sind die Energiespeicher für ein weites Spektrum von Anwendungen geeignet. Eine Übersicht der möglichen Anwendungsgebiete, Funktionen und der entsprechenden Speichertypen zeigt Tabelle 8.3-1. Energiespeicher in Gebäuden und Quartieren können sowohl bei der Integration erneuerbarer Energien in Energiesysteme, als auch die Steigerung der Energieeffizienz unterstützen. Die Vernetzung von Druckluftspeichern oder kinetischen Speichern als mechanische Speicher mit anderen Komponenten in den Energieversorgungssystemen wird in drei Projekten erforscht. Chemische Speicher, die vorwiegend verschiedene elektroche-

Tabelle 8.3-1: Clusterung der verschiedenen Anwendungsgebiete für Energiespeicher [eigene Darstellung, auf Basis von [10]]

	Anwendungsgebiete	Funktionen	Speicherart
Integration Erneuerbarer Energie in / durch ...	Stromversorgungssystem	Lastausgleich, Systemstabilität, CO ₂ -Reduktion, ...	Stromspeicher
	Wärmeerzeugung	In Kombination mit solarthermischen Kraftwerken, solarer Prozesswärme und solaren Nah- / Fernwärmenetzen, ...	Thermischer Energiespeicher
Steigerung der Energieeffizienz von	Bereitstellung von Gas, flüssigen Kraftstoffen und Chemikalien	Sektorkopplung durch Stoffliche Nutzung	Chemischer Energiespeicher
	Industriellen Prozessen	Abwärmenutzung, ...	Thermischer Energiespeicher
	Gebäude	Tag / Nacht-Ausgleich, Sommer / Winter-Ausgleich, Erhöhung des Eigenverbrauchs, ...	Thermischer Energiespeicher
	Mobilität	Rekuperation mechanischer Energie, ...	Batterie

mische Speicher wie bspw. Lithium-Ionen- und Lithium-Titanat-Batterien sind, werden in der Forschung auch als Stromspeicher genutzt. Andere Batterien wie die Redox-Flow-Batterie sowie der Speicher von Elektrofahrzeugen können auch zur Speicherung von lokalen oder regionalen Stromüberschüssen genutzt werden.

Thermische Speicher werden im Vergleich zu anderen Speichertypen häufiger in den Projekten untersucht. Die in den Projekten betrachteten Wärmespeicher können in sensible Wärmespeicher (z. B. Heißwasser-, Kies-/Wasser-Speicher und Erdsonden-/Aquiferspeicher), Latentwärmespeicher und thermochemische Speicher (wie sorptive Speicher) unterteilt werden. Eisspeicher mit niedrigen Temperaturniveaus sind dabei eine Sondervariante der Latentwärmespeicher. Die Verteilung der Anwendungsbereiche der einzelnen Wärmespeicher ist in Abbildung 8.3-3 dargestellt. In allen Anwendungsbereichen, au-

ßer in Wärmenetzen, ist der Heißwasserspeicher die übliche Form der Wärmespeicherung. Danach folgen Latentwärmespeicher mit dem Hauptanwendungsbereich in Wohngebäuden und Eisspeicher in Nichtwohngebäuden. Sowohl in Wärmenetzen als auch in Wohnsiedlungen ist der Erdsonden-/Aquiferspeicher der zweithäufigste installierte Wärmespeicher. Kies-/Wasserspeicher mit hohem Speichervolumen werden sehr selten im Gebäudebereich angewendet. Das Hauptanwendungsgebiet in Forschungsprojekten liegt in übergeordneten Energiesystemen von Quartieren. Sorptive Speicher, als relativ neuer Technologieansatz, werden in drei Projekten mit der Hauptanwendung in Wohn- und Nichtwohngebäuden analysiert. Der Kaltwasserspeicher dient der sensiblen Kältespeicherung und gehört ebenfalls zu den thermischen Speichern. Kaltwasserspeicher werden in 15 Projekten mit Fokus auf einer Umsetzung in Nichtwohngebäuden entwickelt.

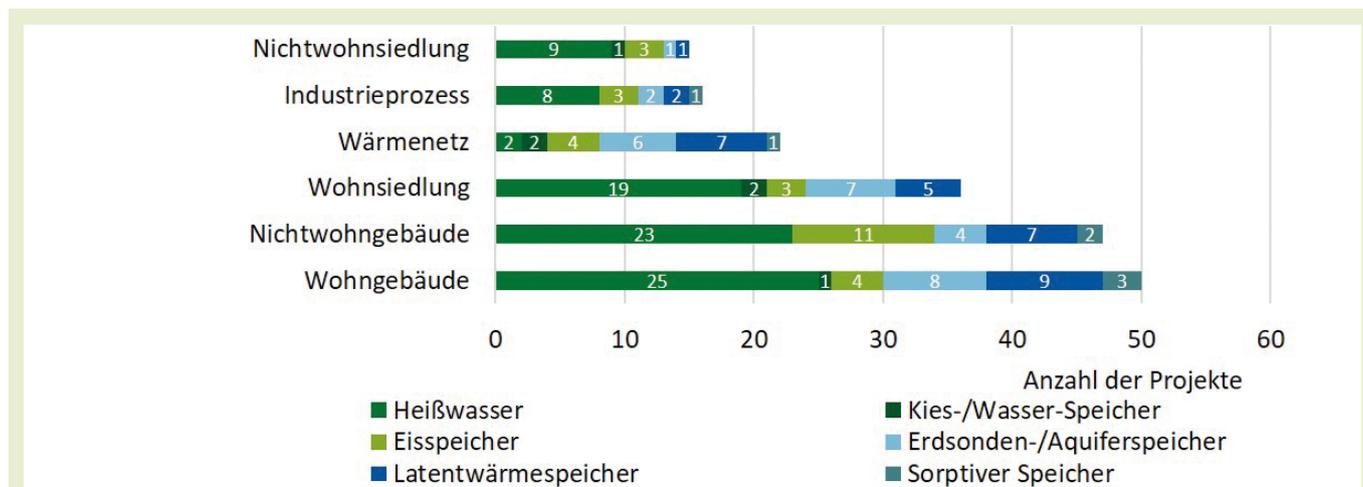


Abb. 8.3-3: Anwendungsbereiche der unterschiedlichen Wärmespeicher in der Förderinitiative

8.4 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurden die Forschungsschwerpunkte im Bereich der Bau- und Anlagentechnologie zusammengefasst. Als Untersuchungsgegenstände sind sowohl einzelne Komponenten mit innovativen Materialien, die besseren Schutz im Brandfall gewähren oder leichter recycelt oder produziert werden können, beschrieben. Zudem werden Konzepte entwickelt, die eine Erhöhung der Energieeffizienz von technischen Komponenten und flächendeckende Umsetzung der Technologie ermöglichen. Primär steht die Gestaltung von optimalen systemischen Lösungen durch die Nutzung von Synergieeffekten bei der Kopplung verschiedener Technologien im Forschungsfokus. Trotz aller zuvor beschriebenen innovativen technologischen Neuerungen geben nur drei Projekte der Kategorie Bautechnologie und zehn Projekte der Kategorie Anlagentechnologie an, dass sie mit den entwickelten Komponenten eine Markteinführung planen. Die Gründe für die geringe Anzahl geplanter Markteinführungen sind nicht in der 3. Fragebogenrunde erhoben worden und spiegeln daher nicht unmittelbar die Marktdurchdringung von neuen Technologien oder eine statistische Repräsentanz wider.

Zur Beantwortung der Fragestellungen bezüglich der Möglichkeiten einer flächendeckenden Umsetzung neuer Technologien in Deutschland, den Hemmnissen und Herausforderungen während der Entwicklung und Umsetzung sowie der Bedeutung der entwickelten Technologien für den Erfolg der Energiewende, präsentieren sich die Projekte MuFuBisS, FlexControl und futureSuN in den folgenden

Beiträgen. Es werden die Erfahrungen aus den Gebieten der aktiven Bauelemente, Speichertechnologie und Low-Exergie-Energieversorgungskonzepte mit Wärmepumpen vorgestellt.

Literatur:

- [1] Krus M., „Innendämmung aus bauphysikalischer Sicht,“ in Fachtagung Innendämmung - eine bauphysikalische Herausforderung, Münster, 2005.
- [2] Korjenic A. J. D., „Untersuchungen zur thermisch-hygri-schen Eignung von Vakuumdämmplatten zur Sanierung von Gebäuden der Wiener Gründerzeit,“ Bauphysik , pp. 344-349, 2003.
- [3] Günther S., „energieheld,“ 03 Juni 2015. [Online]. Verfügbar: <https://www.energieheld.de/blog/durchschnittliche-waermeverluste-eines-hauses/>. [Zugriff am 06 Dezember 2019].
- [4] Umweltbundesamt, „Erneuerbare Energien in Zahlen,“ Umweltbundesamt, 18 Dezember 2019. [Online]. Verfügbar:<https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/erneuerbare-energien/erneuerbare-energien-in-zahlen>. [Zugriff am 27 Januar 2020].
- [5] Bundesverband der Deutschen Heizungsindustrie, „Zahlen des Monats Jahresbilanz des BDH,“ Gebäudeenergieberater, p. 5, März 2019.
- [6] Statistisches Bundesamt, „Baugenehmigungen/Baufertstellungen von Wohn- und Nichtwohngebäuden (Neubau) nach Art der Beheizung und Art der verwendeten Heizenergie, Lange Reihen ab 1980,“ 2019.

- [7] Bründlinger T., „dena-Leitstudie: Integrierte Energiewende - Impulse für die Gestaltung des Energiesystems bis 2050,“ 2018.
- [8] TEAM CONSULT G.P.E. GmbH, „Entwicklung und Perspektiven der Energiespeicherbranche in Deutschland,“ in Energy Storage Europe 2019, Düsseldorf, 2019.
- [9] Statista, „Prognose zum Marktvolumen von Speichertechnologien in Deutschland in den Jahren 2011 bis 2025,“ 20 Februar 2018. [Online]. Verfügbar: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/243852/umfrage/prognose-zum-marktvolumen-von-speichertechnologien-in-deutschland/>. [Zugriff am 03 Februar 2020].
- [10] BVES - Bundesverband Energiespeicher e.V. Berlin und DIHK - Deutscher Industrie- und Handelskammertag Berlin | Brüssel, „Faktenpapier Energiespeicher,“ März 2017. [Online].
- [11] Deutsche Energie-Agentur (dena), „Keine Energiewende ohne Wärmewende,“ dena, [Online]. Verfügbar: <https://www.dena.de/themen-projekte/energieeffizienz/gebaeude/>. [Zugriff am 27 Januar 2020].
- [12] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), „Innovationspolitik,“ BMWi, [Online]. Verfügbar: <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Dossier/innovationspolitik.html>. [Zugriff am 27 Januar 2020].
- [13] Statistisches Bundesamt (Destatis), „Mikrozensus 2018,“ 2019. [Online]. [Zugriff am 27 Januar 2020].

Kontakt:

RWTH Aachen
Lehrstuhl für Gebäude- und Raumklimotechnik

Yizhuo Zhang, M.Sc.
yizhuo.zhang@eonerc.rwth-aachen.de

Sarah Welter, M.Sc.
sarah.welter@eonerc.rwth-aachen.de

Dr.-Ing. Tanja Osterhage
tosterhage@eonerc.rwth-aachen.de

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dirk Müller

8.5 Multifunktionale Betonfertigteilelemente mit schaltbarer Vakuumdämmung

8.5.1 Einleitung

Die Steigerung der Energieeffizienz von Gebäuden ist aufgrund von steigenden Energiepreisen, den knapper werdenden fossilen Energiereserven und des voranschreitenden Treibhauseffektes von zentraler Bedeutung. Die Minimierung von Transmissionswärmeverlusten und die solare Wärmespeicherung in Betontragstrukturen stellen wesentliche Lösungsansätze zur Verbesserung der Energieeffizienz dar. Um einen entscheidenden Beitrag zur Weiterentwicklung von Gebäudehüllen in Richtung energieeffizienter Systeme zu leisten, wird eine Grundlagentechnologie für regelbare, vakuumisolierte Dämmelemente entwickelt und deren Anwendung in mehrschichtigen Wandbauteilen erforscht. Dabei wurde ein Verbundfassadenelement aus einer Fassadenplatte und einer regelbaren Vakuumdämmschicht entwickelt. In der Innenschale ist eine funktionalisierte FKB (Faserkunststoffbewehrung) mit integrierter thermischer Aktivierung angeordnet, welche das Temperieren der Betonschale ermöglicht. Die Verbindung der Schichten erfolgt durch Verbunddübelleisten mit geringer Dicke, welche eine Kraftübertragung über das Dämmelement ermöglichen. Darüber hinaus wurden im Projekt Demonstratoren hergestellt, die energieeffiziente Techniken vereinen und in umfangreichen Langzeitmessungen an einem realen Gebäude sowie unter Laborbedingungen geprüft und bewertet wurden. Das Monitoring wurde von thermischen Bauteil-

simulationen begleitet, die den Messergebnissen gegenübergestellt und evaluiert wurden. Ganzheitliche Gebäudesimulationen sollen die Potenziale der Entwicklungsziele für den Einsatz in Gebäuden und in Quartieren aufweisen. Darauf basieren die angestrebten Regel- und Schaltstrategien des Bauelementes zur Einbindung in eine ganzheitliche Gebäudeautomatisierung.

8.5.2 Aufbau und Funktionalitäten des Wandelementes

In Abbildung 8.5-1 ist der schematische Aufbau des Wandelementes dargestellt. Durch die Anordnung von einer oder zwei Vakuumdämmschichten im Wandaufbau können unterschiedliche energetische Funktionalitäten ausgebildet werden. Die Anordnung einer regelbaren Dämmung ermöglicht eine Wärmegewinnung und gleichzeitig die Vermeidung von Transmissionswärmeverlusten am gesamten Wandbauteil. Bei zwei Dämmschichten kann zusätzlich eine Speicherung der solaren Wärme im Beton des Wandelementes erfolgen. Die zusätzliche Anordnung der raumseitigen Dämmung ermöglicht hohe Speichertemperaturen im Betonkern ohne die Behaglichkeit im Raum zu verletzen, die Regelbarkeit ermöglicht eine gezielte Abgabe von Wärme an die Innenräume bei Heizwärmebedarf. Mit der Integration von thermisch aktivierter Faserkunststoffbewehrung in der Tragschicht kann Wärme über eine Stromheizung in die Betonschicht eingespeist werden. Bei der Kopplung der Vakuumdämmungen an die Betonschalen kann nicht auf konventionelle stabförmige Verbindungsmittel wie beispielsweise

aus glasfaserverstärkter Kunststoff (GFK) zurückgegriffen werden, da sie die vakuumdichte Hülle des GVI-Paneels (gestützte Vakuum-Isolierungen-Paneel) durchstoßen und somit eine Beschädigung des gesamten Wandelementes hervorrufen. Zur Sicherstellung der Unversehrtheit und vollständigen Funktionalität des Wandelementes werden mit dünnen, puzzelförmigen Verbunddübeln neuartige Befestigungselemente für Wandelemente eingesetzt; mehrere Verbunddübel bilden dabei eine Verbunddübelleiste. Diese bestehen wie die GVI's® aus Edelstahl und werden einfach im Herstellungsprozess an dasselbige angeschweißt. Die Untersuchungen zum Last-Verformungsverhalten von Verbunddübeln bilden einen zentralen Forschungsgegenstand des Projektes.

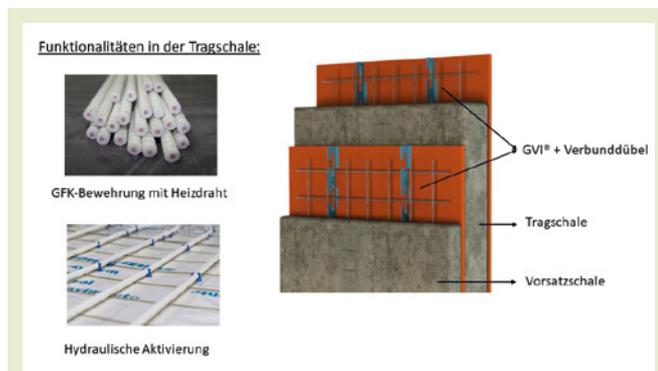


Abb. 8.5-1: Funktionalitäten und schematische Darstellung des MuFuBisS – Wandelementes

8.5.3 Thermische Komponenten für das Gebäudeenergiekonzept

8.5.3.1 Eigenschaften und Funktionen von gestützten Vakuum-Isolierungen (GVI®)

Allgemein gibt es zwei Gruppen an Vakuumdämmsystemen. Einmal die Vakuumisulationspaneele (VIP), diese werden bereits seit einigen Jahren im Hochbau eingesetzt: als Dämmung von Flachdächern oder Terrassen in Reihenhäusern, als Außenwanddämmung oder als Innendämmung. Die VIP-Schichten sind mit verschiedenen Schutzstrukturen versehen, um die empfindlichen Kuvertierfolien des VIP nicht zu beschädigen. Insbesondere für großvolumige technische Anwendungen bestehen bei diesen Vakuum-Isolationen folgende Schwierigkeiten:

- Sehr hohe Anforderungen an die Vakuumerzeugung,
- Extreme Dichtheitsanforderungen, um das einmal erzeugte Vakuum über Jahre aufrecht zu erhalten,
- Druckfeste Auslegung der Behälterwände.

Im Rahmen dieses Projektes wurden diese Probleme mit sogenannten gestützten Vakuum-Isolierungen (GVI®) gelöst. GVI®-Systeme sind mit metallischer Hülle so konzipiert, dass sie sowohl tragende Funktionen als auch sehr gute Dämmeigenschaften erfüllen. Der Isolationsraum wird auch bei diesem System von einer vakuumdichten Umhüllung gebildet.

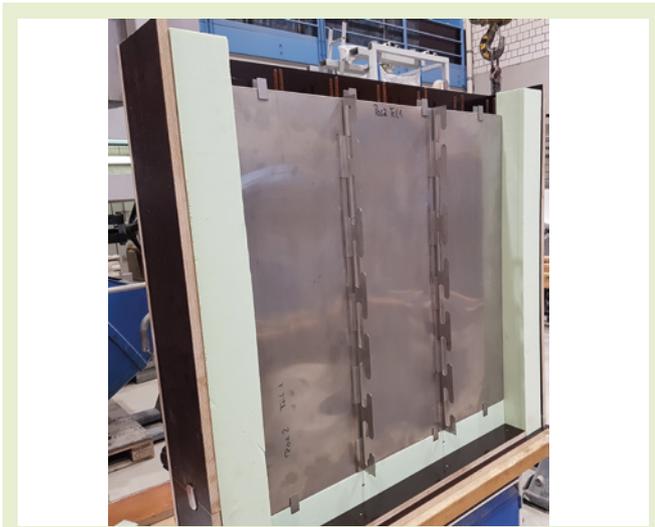


Abb. 8.5-2: GVI-Panel

Allerdings wird dieser Dämmpalt von einem feinporösen Werkstoff ausgefüllt, welcher die beiden Wandungen gegeneinander abstützt. Mit der GVI®-Technologie können sowohl dreidimensionale Behälter beliebiger Größe als auch flache Bauelemente – sogenannte Paneele – hergestellt werden. Somit ist es möglich, große Fassadenelemente mit integrierten Verbunddübelleisten als Befestigungselemente zu realisieren. In Abb. 8.5-3 sind die Dämmeigenschaften unterschiedlicher Dämmverfahren dargestellt. Als Maß für das Dämmvermögen ist hier der Lambda-Wert – λ in $W/(mK)$ – für unterschiedliche Temperaturen dargestellt. GVI®-Systeme mit mineralischen Stützkörpern können für Anwendungstemperaturen von 500 °C (Glasfasersysteme) bzw. 900 °C bis 1.000 °C (keramische Fasern oder Hochtemperatur-Glasfasern) ausgelegt werden. Eine Besonderheit des eingesetzten GVI®-Systems ist, dass dieses bei Bedarf in seinen Dämmeigenschaften ge-

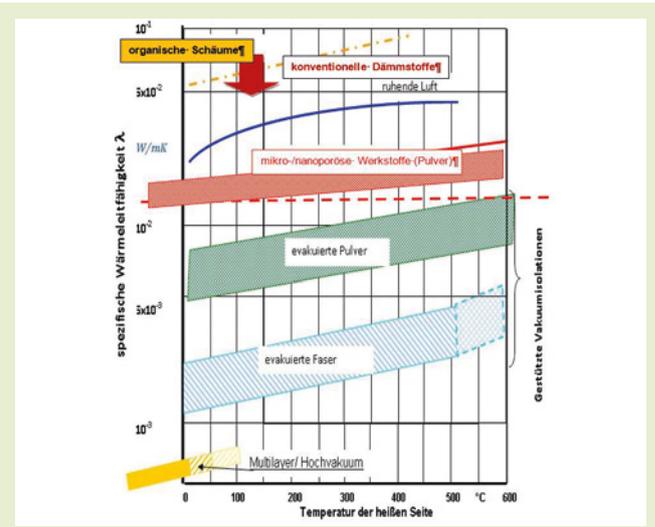


Abb. 8.5-3: Dämmeigenschaften unterschiedlicher Dämmverfahren

regelt werden kann, indem der Restgasdruck in der Isolierung variiert wird. So kann beispielsweise der Partialdruck von einem Gas mit sehr hoher Wärmeleitfähigkeit geringfügig angehoben und damit die Isolierwirkung der Dämmung bis zu einem Faktor 100 verschlechtert werden. Im Folgenden werden die Vorteile von GVI® Systemen aufgezeigt:

- Dämmeigenschaften bis zu 30-fach besser als bei konventionellen Dämmsystemen und dadurch energetisch hoch effizient,
- Extrem hohe Steifigkeit und Festigkeit,
- Leichte Tragstrukturen / Leichtbau,
- Hermetisch gekapselte Dämmschicht -> keine Taupunkts-Problematik,
- Variable/ regelbare Dämmwirkung.

8.5.3.2 Untersuchungen zum thermischen Verhalten von GVI's

Die schaltbare Wärmedämmung (GVI®) besteht aus einem thermokomprimierten Mikroglasfaserboard in einem luftdichten Edelstahlgehäuse. Das Mikroglasfaserboard dient zur Stabilisierung des Edelstahlgehäuses im evakuierten Zustand bei einem Gasinnendruck von 0,15 mbar. Der Gasinnendruck kann über ein Gettermaterial variiert werden. Im Gettermaterial ist Wasserstoff gebunden, welches in Abhängigkeit der Gettertemperatur frei wird. Dadurch wird ein Gasinnendruck von bis zu 100 mbar möglich. Im Forschungsprojekt sind thermische Versuche mit dem Ziel, die stationären thermischen Eigenschaften in einem Bereich des Gasinnendrucks zwischen 0,15 mbar und 100 mbar der schaltbaren Wärmedämmung zu ermitteln, durchgeführt worden. Dazu wurde im ersten Schritt der Gasinnendruck in Abhängigkeit der Gettertemperatur ermittelt. In einem im Projekt entwickelten thermischen Versuchsstand wurden die Oberflächentemperaturen sowie der Wärmestrom unter Normbedingungen in Abhängigkeit des Gasinnendrucks ermittelt. Aus den Versuchsergebnissen lässt sich der Zusammenhang aus Wärmeleitfähigkeit und Gasinnendruck ableiten. Unter Berücksichtigung der Versuchsergebnisse diente ein thermisches Modell zur Ermittlung des Wärmebrückeneinflusses der umlaufenden Edelstahlhülle auf den mittleren Wärmedurchgangskoeffizienten. Mit der schaltbaren Wärmedämmung ist es möglich einen mittleren Wärmedurchgangskoeffizienten im Bereich zwischen 0,28 W/(m²K) und 4,78 W/(m²K) einzustellen.

Dies entspricht einem Schalthub des Wärmedurchgangs um das 25-fache.

8.5.3.3 Integration von thermischen Bewehrungselementen

Die Integration von thermisch aktivierbaren Bewehrungselementen im Wandelement stellt einen erheblichen Beitrag zur Ressourcenschonung dar und ermöglicht die Speicherung von Wärme in der Tragstruktur. Im Forschungsprojekt konnte erstmalig durch den Einsatz von glasfaserverstärkten Kunststoffen die Tragfunktion eines Bewehrungsstabes mit der energetischen Nutzung für einen dauerhaften Einsatz in Betonbauteilen erfolgreich kombiniert werden (siehe Abb. 8.5-1). Das Herstellverfahren der Faserverbundkunststoffe (FVK) Bewehrungsstäbe, das sogenannte Pultrusionsverfahren, wurde herangezogen, um Endlosmaterialien, wie beispielsweise Heizdrähte, prozesssicher zu integrieren. Ein grundlegender Vergleich verschiedener Stabvarianten sowie die experimentelle Untersuchung verschiedener Prototypen ermöglichten einen iterativen Optimierungsprozess bis hin zur endgültigen Zusammenstellung des großproduktionstauglichen, thermisch aktivierbaren Bewehrungsstabes.

8.5.3.4 Multifunktionale Komponenten für die aktive energetische Nutzung der Gebäudehülle

Um das GVI® energetisch nutzen zu können, muss dieses in das Gebäudeenergiekonzept integriert werden. Da die Speicherung von erneuerbarer Wärme eine zentrale Problemstellung bei der Ener-

giehwende ist, sollen die massiven, tragenden Bauteile zur Speicherung genutzt werden. Neben der Integration von Bewehrungsstäben mit Heizdrähten kann noch über eine hydraulische Aktivierung (Kunststoffrohr), als eine Art Fußbodenheizung im Kern der Außenwand, Wärme in diese eingebracht werden. Infolge der Anordnung des GVI's® auf der Innenseite kann zum einen die Wärme bedarfsgerecht vom Bauteil an den Raum abgegeben werden und zum anderen die Wärmeverluste auch dann reduziert werden, wenn das Bauteil ausgekühlt ist. Zur Abschätzung der Reduktion des Strombedarfes wurden Vergleichsrechnungen am Standardgebäude IAC SHC Task 32 durchgeführt. Bei einem normierten Standardgebäude, nach IEA SHC Task 32, mit rd. 140 m² Wohnfläche werden unterschiedliche Ausrichtungen und Anteile der Außenwand mit diesem System ausgestattet. Auf dem Süddach befindet sich eine Solarthermieanlage mit rd. 40 m², welche von einer elektrischen Wärmepumpe unterstützt wird. Die Wand wird immer dann beladen, wenn mehr Wärme zur Verfügung steht, als der Pufferspeicher speichern kann. Durch diese Kombination aus GVI®, erneuerbaren Energien und Regelung kann der Strombedarf der Wärmepumpe, welcher den Großteil des gesamten Strombedarfs ausmacht, um rd. 24 % reduziert werden. Dies ist auf eine Steigerung des Anteils solarer Wärme und einer damit verbundenen Verdrängung der Wärmeerzeugung durch die Wärmepumpe zurückzuführen.

8.5.4 Umsetzung der Ergebnisse aus dem Forschungsvorhaben

8.5.4.1 Demonstrator im „Small House“ an der TU Kaiserslautern

Um die Ergebnisse aus den statischen, thermischen Versuchen und Simulationen umzusetzen und die Machbarkeit des hier vorgestellten Wandelementes zu zeigen, wurde an der Technischen Universität in Kaiserslautern ein Demonstrator in Originalgröße geplant und hergestellt, siehe Abb. 8.5-4..



Abb. 8.5-4: Demonstrator

Anschließend wurde er nach der Herstellung im Small-House-Village an der TU Kaiserslautern eingebaut, siehe Abb. 8.5-5. Der Demonstrator weist einen vierschichtigen Aufbau bestehend aus einer Vorsatz- und Tragschale aus Beton sowie aus zwei GVI's® auf. Der gesamte Demonstrator wird mit einem Dämmkranz aus EPS eingehaust, um die „Wärmebrücken“ zu minimieren. In der Tragschale



Abb. 8.5-5: Einbau des Demonstrators in das Small House

des Demonstrators wurden verschiedene Funktionalitäten angeordnet. Neben dem Einbau von zwei GFK Bewehrungsmatten mit integrierten Heizdrähten wurde noch eine hydraulische Aktivierung aus Kunststoffrohren verlegt. Für das anschließende Monitoring wurden über 21 Temperatursensoren in der Vorsatz- und Tragschale einbetoniert. Die wärmebrückenarme Anbindung des Demonstrators an das Small-House erfolgte über drei Spannschlösser aus GFK.

Mit Hilfe des Großdemonstrators konnte gezeigt werden, dass die elektrische Bewehrung zur Ein-

speicherung von Wärme genutzt werden kann und entsprechende Bauteile herstellbar sind. Die Kombination aus elektrischer und hydraulischer Aktivierung erlaubt damit nicht nur, überschüssigen Strom aus dem öffentlichen Stromnetz bzw. der eigenen PV-Anlage als Wärme zu speichern, sondern auch Erträge aus einer Solarthermie-Anlage ohne große Pufferspeicher nutzbar zu machen.

8.5.4.2 Mustergebäude „InnoLiving“ der Firma Innogration GmbH

Entwicklungen sind immer dann erfolgreich, wenn sich deren Einsatz im alltäglichen Betrieb nachhaltig und wirtschaftlich nachweisen lässt. Mit dem Bau des Mustergebäudes „InnoLiving“ auf dem Gelände der Innogration GmbH in Bernkastel-Kues Abbildung 8.5-6 wird dieses Ziel verfolgt. Ein kleines Bürogebäude mit einer Fläche von ca. 60 m² wird zukünftig als Arbeitsplatz für die Auszubildenden und die dualen Studenten der Innogration GmbH genutzt. Mehrere neue Entwicklungen finden sich in diesem Gebäude wieder. Ziel dieses Vorhabens ist der Nachweis, heutzutage energieautarke Gebäude erstellen und auch mit einem hohen Nutzerkomfort betreiben zu können. Die Konstruktion wird aus Betonfertigteilen hergestellt. Auch die erforderliche Dämmung von Fassade und Dach wird vorgefertigt, sodass das komplette Gebäude sehr schnell errichtet werden kann. Die Wände der Fassade bestehen aus einem neuartigen und sehr nachhaltigen Hybridbauteil, welches sich aus einer dünnen Betonscheibe aus Recyclingbeton und einer Holzständerkonstruktion zusammensetzt. Die über 10 m weit



Abb. 8.5-6: Gebäude InnLiving mit den einzelnen Komponenten zur Wärmeenergieversorgung

gespannten Decken lassen sich dank der gewählten Querschnittsform und einer vorgespannten Bewehrung nur mit geringem Materialeinsatz aus Beton herstellen. Die Gebäudetechnik Abb. 8.5-7 nutzt entsprechende Technologien, um Wärmeenergie aus der Umwelt einzusammeln, zu speichern und dann für die Nutzung im Gebäude zu verteilen. Die Verteilung der Energie erfolgt über die tragende Decke und über die leistungsfähigen, neu entwickelten Deckensegel sowie über die Betonwände mit der schaltbaren Vakuumdämmung (GVI). Für das Einsammeln der Wärmeenergie wird die Fassade und der besonders gestaltete Dachaufbau genutzt. Die Speicherung der Wärmeenergie findet u. a. über eine tragende Betonwand statt, die vollständig mit einer schaltbaren Vakuumdämmung umhüllt ist. Die äußere Seite der Wand kann auch Wärme über die direkte Strahlung aufnehmen, sofern die Vakuumdämmung entsprechend geschaltet ist. Zur Verstärkung der Wärmeeinstrahlung dient eine in der

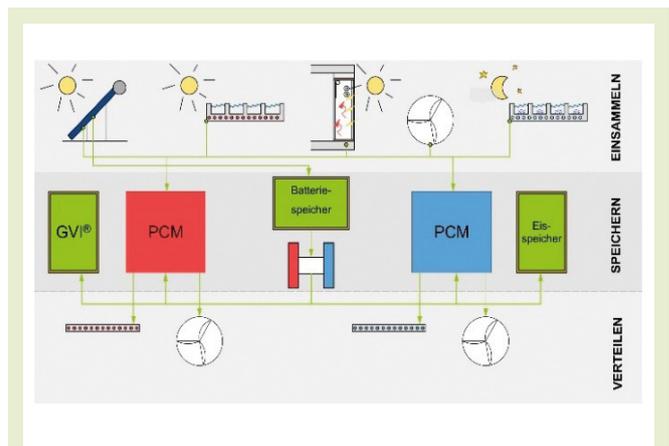


Abb. 8.5-7: Schematische Darstellung der Komponenten für die autarke Wärmeenergieversorgung

Fassade vorgelagerte Glasscheibe. Die weitere Beladung des gedämmten Betonspeichers erfolgt über eingelegte wasserführende Rohre sowie über thermisch aktivierbare Bewehrungsstäbe aus GFK. Ergänzend zu dem Wärmespeicher aus Beton werden diverse PCM-Speicher eingesetzt, um insbesondere die verschiedenen Temperaturniveaus abdecken zu können. Das Einsammeln der Wärmeenergie erfolgt durch die unmittelbare Nutzung des durch die Einstrahlung zur Verfügung stehenden Temperaturniveaus. Dieser Effekt lässt sich z. B. durch die gezielte Anordnung von einzelnen Glasscheiben (Gewächshauseffekt) verstärken. Die zwischen der inneren und äußeren Glasscheibe der Fassade durch Einstrahlung entstehende Wärmeenergie wird über wassergeführte Spiralrohre aufgefangen und auf unterschiedliche Speicher verteilt. Auf analoge Weise erfolgt das Einsammeln über das Dach, da die Fläche über dem Betonabsorber wie bei einem Gewächshaus vollständig mit Glas bedeckt ist. Es

steht ausreichend Wärmeenergie aus dem jahreszeitlichen Temperaturgefälle zur Verfügung, die nur entsprechend gespeichert werden muss. Ergänzend kann bei Bedarf die von der Nutzung her erforderliche Temperatur durch den kurzfristigen Einsatz von Peltier-Elemente (vergleichbar einer Wärmepumpe) erzeugt werden, die ihrerseits mit dem gespeicherten PV-Strom versorgt werden.

8.5.5 Schlussfolgerung

Die angestrebten Entwicklungsziele innerhalb des Projektvorhabens MuFuBisS folgten dem gesamtstaatlichen Interesse, die Entwicklung von energieeffizienten Komponenten im Gebäudebereich voranzutreiben. Es wurde ein Fassadenkonzept in Form eines integrierten aktiven Fassadensystems umgesetzt, das mit Hilfe von Vakuumtechnologie eine Schalt- bzw. Regelbarkeit des Wärmedurchlasses ermöglicht. Die im Projekt MuFuBisS geplanten Gebäudefunktionen, wie lang- und kurzfristige Wärmespeicherung durch Betonkernaktivierung und Verbesserung der thermischen Behaglichkeit in Gebäuden durch Automatisierung und Regelung als intelligente Gebäudeautomatisierung, verfolgt konsequent die förderpolitischen Ziele bezüglich der Energieeffizienz, dem Einsatz von Erneuerbaren Energien, neuer Netztechnologien und Energiespeicher, der Systemintegration im Zusammenwirken von Gebäuden, Quartieren und Energieinfrastruktur und orientiert sich eng am Leitbild „Gebäude der Zukunft“, das die Realisierung energieoptimierter, nachhaltiger, funktionaler und behaglicher Gebäude zu vertretbaren Investitionen und Be-

triebskosten im Fokus hat. Des Weiteren konnten im Rahmen des Projektes Prototypen erfolgreich hergestellt und die Funktionalitäten nachgewiesen werden. Um diese perspektivisch als Produkt herstellen zu können, muss v. a. die serielle Herstellbarkeit weiter erforscht werden. Dies umfasst sowohl die betontechnischen, als auch die elektrotechnischen Fragen.

Die Autoren danken dem Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) für die finanzielle Unterstützung und allen Projektbeteiligten des Forschungsprojekts „MuFuBisS“ (03ET1399).

Literatur:

- [1] Kiesche M., Pahn M.: Transient thermal behaviour of switchable vacuum insulation panels, 14th Conference on advanced Building Skins, 28-29 October 2019, Bern, Switzerland, pp.700 –709.
- [2] Penkert F., Pahn M.: Behaviour of thin puzzle-shaped composite dowels in multi-layer wall elements. Proceedings of the fib Symposium 2019- Concrete- Innovations in Materials, Design and Structures, 27-29 May 2019, Krakow, pp. 1259–1266.
- [3] Gauer T., Pahn M.: Multifunctional components for the active energetic use of the building envelope, 14th Conference on advanced Building Skins, 28-29 October 2019, Bern, pp. 715- 725.
- [4] Penkert, F., Pahn, M.:
Load-transferring and switchable- Vacuum insulation for sandwich wall panels, Proceedings of 64. BetonTage in BFT International, 02 2020, S.49.
- [5] Pahn M., Caspari C. : Multifunktionale Betonfertigteile: Großdemonstrator „SmallHouseIV“, BFT International 2018

Kontakt:

Technische Universität Kaiserslautern
Massivbau und Baukonstruktion

Prof. Dr.-Ing. Matthias Pahn
matthias.pahn@bauing.uni-kl.de

Dipl.-Ing. Fabian Penkert
fabian.penkert@bauing.uni-kl.de

Dipl.-Ing. Tillman Gauer
tillman.gauer@bauing.uni-kl.de

Martin Kiesche, M.Sc.
martin.kiesche@bauing.uni-kl.de

Dipl.-Ing. Mona Lisa Keller
mona.keller@bauing.uni-kl.de

Dr. Jobst Kerspe
TEB Dr. Kerspe
kerspe@vakuum-isolierung.de

Dipl.-Ing TH Thomas Friedrich
Innogrations GmbH
th.friedrich@innogrations.de

Michael Fischer
König Metall GmbH & Co.KG
m.fischer@koenigmetall.com

8.6 Prädiktive Regelstrategien für netzdienlichen Betrieb von Wärmepumpen

8.6.1 Das Gebäudeenergiesystem der Zukunft

Der Ausbau dezentraler, auf erneuerbaren Energien basierender Generatoren führt zu starken zeitlichen Schwankungen in der Stromproduktion. Gleichzeitig wird zum Erreichen der Klimaschutzziele eine zunehmende Elektrifizierung der Bereiche Wärmeversorgung (über Wärmepumpen) und Mobilität (Elektrofahrzeuge) erwartet, was erhöhte Anforderungen an die Stabilität der Stromnetze stellt. Durch ein sogenanntes Demand-Side-Management (DSM) können Gebäude zur Stabilisierung beitragen, indem sie ihren Strombezug zur Wärme- und Kältebereitstellung an die Bedürfnisse der Netze anpassen und damit durch Lastglättung und Lastverschiebung in Zukunft aktiv eine netzdienliche Rolle spielen. Unter dem Begriff „Netzdienlichkeit“ ist ein Strombezugsverhalten zu verstehen, das im Hinblick auf eine gewählte netzbasierte dynamische Referenzcharakteristik vorteilhaft ist. Ein solches Netzsignal könnte z. B. der Strompreis, die Residuallast, der Anteil erneuerbarer Energien im Strommix oder die CO₂-Emissionen sein.

Im Verbundvorhaben „flexControl“ werden neuartige Betriebsführungsstrategien für eine energieeffiziente und netzdienliche strombasierte Wärme- und Kälteversorgung von Neubau- und Bestandsgebäuden im Gewerbe-/Handels-/Dienstleistungssektor (GHD) entwickelt. Der Schwerpunkt liegt auf dem Einsatz von Wärmepumpen, die durch die Ausnut-

zung von Umweltenergie und der Bereitstellung von Wärme auf niedrigem Temperaturniveau ein hohes Effizienzpotential aufweisen und in Verbindung mit thermischen Speichern zusätzlich ein hohes Lastverschiebepotential bieten (power to heat). Insbesondere im größeren Leistungsbereich – etwa für die Versorgung von Büro- und Gewerbegebäude – kann durch Interaktion mit dem elektrischen Versorgungsnetz eine Lastverschiebung durch das effiziente Erzeugen und Zwischenspeichern von Wärme und Kälte ermöglicht werden.

8.6.2 Technische Herausforderungen eines netzdienlichen Wärmepumpenbetriebs

Eingebunden in einem Gesamtsystem, liegen die in der Praxis erreichten Jahresarbeitszahlen von Niedrigexergiesystemen häufig unter den thermodynamisch möglichen Jahresarbeitszahlen [5]. Eine signifikante Schwachstelle ist dabei die nicht aufeinander abgestimmte Regelung der hocheffizienten Einzelkomponenten im Gesamtsystem. Um das hohe Energieeffizienz- und Netzdienlichkeitspotential von Wärmepumpen auszuschöpfen, ist eine abgestimmte Anlagenkonfiguration (insbesondere Hydraulik) als auch Regelung der hocheffizienten Einzelkomponenten im Gesamtsystem notwendig. Die Anforderungen, denen ein netzdienlicher Betrieb von Gebäuden bzw. Anlagen gerecht werden muss, sind vielfältig und je nach Branche unterschiedlich, siehe Abb. 8.6-1.

Es gilt, die Anforderungen der Nutzer mit den Anforderungen von Seiten des Stromnetzes in Ein-



Abb. 8.6-1: Zusammenhänge der Anforderungen an ein netzdienliches Gebäude [Hochschule Biberach]

klang zu bringen. Das Bindeglied stellt hierbei die Anlagentechnik dar, welche je nach Ausgestaltung ein unterschiedliches Maß an Flexibilität bieten kann. Voraussetzung sind Anlagenkonzepte, welche die Stromerzeugung, bspw. Solarenergie oder Kraft-Wärme-Kopplung (KWK), oder den Stromverbrauch (bspw. Wärmepumpe/Kältemaschine) mit einer Wärme- bzw. Kälteerzeugung koppeln oder kombinieren. Gebäude als Verbraucher stellen im Gegensatz zu konventionellen Kraftwerken schnell regelbare Systeme dar und sind damit geeignet, kurze Reaktionszeiten zu ermöglichen. Eine weitere Voraussetzung sind thermische Speichermöglichkeiten – sei es in Form von technischen Speichern oder systeminhärenten Speichermöglichkeiten (bspw. Gebäudemasse über Betonkernaktivierung). Im Verbundprojekt wurden anhand beispielhaft durchgeführter Untersuchungen konkrete Empfehlungen für Anlagenkonzepte für einen netzdienlichen

Betrieb abgeleitet. Für die Kälteversorgung eines Supermarktes eignet sich z. B. eine zentrale Kältebereitstellung mit Kälteverteilung über einen Solekreis und integriertem Solepufferspeicher. Im Allgemeinen ist eine Flexibilität der Anlagen immer dann vorhanden, wenn die Leistung des aktuellen Bedarfs unter der Auslegungsleistung der Anlage liegt. Dies ist in Teillastzeiten oder bei Überdimensionierung der Anlage der Fall. Untersuchungen haben gezeigt, dass eine Steigerung sowohl der Anlagenleistung, als auch der Speicherkapazitäten nur bis zu einem bestimmten Grad eine nennenswerte Erhöhung der Flexibilität bewirken. Aus verschiedenen Analysen kann für die Dimensionierung technischer Speicher für die Umsetzung einer netzdienlichen Betriebsstrategie ein Richtwert von ca. zwei Volllast-Stunden des Erzeugers angegeben werden, in bestehenden Anlagen finden sich Größen in der Ordnung von einer halben Volllaststunde [7]. Eine Wirtschaftlichkeit überdimensionierter Anlagen ist jedoch – bei derzeitiger Tarifstruktur des Energiebezugs – nicht gegeben, wie die durchgeführten Untersuchungen zeigen [1],[2],[8].

Eine große technische Herausforderung in der Integration optimierter Regelungsstrategien für Wärmepumpen im Gebäude liegt in der eingesetzten herkömmlichen Anlagenregelung, die nicht in der Lage ist, das komplexe Gesamtsystem im optimalen Betriebspunkt oder zusätzlich unter Berücksichtigung eines externen Netzsignals zu betreiben. Strategien zur Regelung und Steuerung müssen jedoch sowohl den optimalen Einsatz einzelner Komponenten und Subsysteme, als auch den effizienten Betrieb des Gesamtsystems aus Einbindung

der Umweltwärmequelle/-senke und Erzeugung, Speicherung, Verteilung und Übergabe von Wärme und Kälte berücksichtigen. Ein bedeutender, aber oftmals vernachlässigter Faktor für die Steigerung der Effizienz und des Nutzerkomforts ist die Einbeziehung vorhandener Informationen über die zukünftige Entwicklung der Randbedingungen, z. B. Wettervorhersagen und Vorhersagen der Gebäudenutzung – für einen netzdienlichen Betrieb des Stromnetzzustandes darüber hinaus, etwa anhand einer Netzreferenzgröße. Aufgrund der zeitlichen Latenz der Gebäudemasse stellen solche prädiktive Regelstrategien einen notwendigen Ansatz für die Realisierung netzdienlicher Betriebsführung dar. Eine optimale prädiktive Betriebsführungsstrategie stellt die, auf mathematische Optimierung basierende, modellprädiktive Regelung (MPC) dar.

8.6.3 Prädiktive Regelung von Wärmepumpen

Das Ziel netzdienlicher Betriebsführungsstrategien ist es, strombasierte Wärme- und Kälteerzeuger in Kombination mit thermischen Speichern so einzusetzen, dass sie mehrheitlich zu Zeiten mit hohem Anteil erneuerbarer Energieträger im Stromnetz bzw. niedrigen Stromkosten betrieben werden. Für unterschiedliche Erzeuger- sowie Speicherdimensionierung und Gebäudenutzung wurden modellprädiktive, optimale Regler entwickelt, die in dynamischen Simulationen für verschiedene Anreizsignale ausgewertet wurden. Die anderen im Projekt bearbeiteten Studien umfassen die Klimatisierung von Bürogebäuden [3], [8] und eines Supermarktes,

unter Berücksichtigung des Lastverschiebepotentials der Prozesskältebereitstellung der Kühlmöbel [1], [2]. Bei der Auswertung der Ergebnisse kann gezeigt werden, dass eine optimierte Regelung strombasierter Anlagen der Wärme- und Kälteversorgung zu einem deutlich energieeffizienteren, aber auch netzdienlicherem Verhalten im Vergleich zur Standardregelung führt. Das genaue Potential hängt von dem betrachteten System und Netzsignal ab. Die Simulationsergebnisse für den Wärmepumpenbetrieb für die Wärmeversorgung eines Bürogebäudes für das Jahr 2018 sind in Tabelle 8.6-1 zusammengefasst. Gegenüber der herkömmlichen, nicht-optimierten und nicht-vorausschauenden Regelung kann sowohl die auf Energieeffizienz optimierte, als auch die auf Netzdienlichkeit optimierte Regelung mindestens 10 % der Kosten als auch CO₂-Emissionen einsparen.

Aufgrund der großen Wichtigkeit für die Stabilität des Energiesystems sollte Netzdienlichkeit aber nicht nur vom ökonomischen Gesichtspunkt betrachtet werden. Als Bewertungsmaßstab eignet sich der „Grid Support Coefficient GSC“ [5]. Der GSC_{abs} bewertet das zeitaufgelöste Stromver-

$$GSC_{abs}(G) := \frac{\sum_{i=1}^n W_{el}^i \cdot G^i}{W_{el} \cdot \bar{G}}$$

Wobei W_{el}^i und G^i die zeitaufgelösten Werte des Stromverbrauchs bzw. Netzsignals sind,

$$W_{el} := \sum_{i=1}^n W_{el}^i \quad \text{der Gesamtstromverbrauch und}$$

$$\bar{G} := \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n G^i \quad \text{der Durchschnittswert.}$$

Tabelle 8.6-1: Vergleich simulierter Wärmepumpenheizbetrieb eines Bürogebäudes für das Jahr 2018 mit Standardregelung und modellprädiktiver Regelung (optimiert nach Energieeffizienz bzw. Netzdienlichkeit mit Variation der Speicherüberhitzungstemperatur). Stromkosten basieren auf variablen EEX-Börsenpreis mit fiktivem Fixkostenaufschlag von 20 Cent/kWh_{el}.

	Standard Regelung	Energie- effizient	Netzdienlich T_{Sp,max}=50°C	Netzdienlich T_{Sp,max}=55°C	Netzdienlich T_{Sp,max}=62°C
Energieverbrauch	13,0 MWh _{th} 2,91 MWh _{el}	12,9 MWh _{th} 2,37 MWh _{el}	12,9 MWh _{th} 2,44 MWh _{el}	12,9 MWh _{th} 2,48 MWh _{el}	12,9 MWh _{th} 2,53 MWh _{el}
Jahresarbeitszeit	5,5	6,4	6,0	5,9	5,8
Stromkosten	727 €	591€	594 €	599 €	606 €
CO₂-Emissionen	1,58 t	1,29t	1,31 t	1,33 t	1,35 t
GSC_{abs}	1,10	1,09	0,96	0,92	0,88

brauchsverhalten von Gebäuden gewichtet mit dem Netzsignal:

Bezogen auf den EEX-Strombörsenpreis würde ein günstiger bzw. netzdienlicher Verbraucher seinen Strom eher in Zeiten mit niedrigem Strompreis beziehen, womit man $GSC_{abs}(G) < 1$ erhält. Während ein ungünstiger bzw. netzadverser Verbraucher den Strom eher zu Zeiten mit hohem Strompreis bezieht und durch einen $GSC_{abs}(G) > 1$ gekennzeichnet wäre. Ein $GSC_{abs}(G) = 1$ bezeichnet einen netzneutralen Bezug zu mittleren Strompreisen.

Für eine erfolgreiche praktische Umsetzung ist es unerlässlich, dass diese Strategien in Bestandsgebäuden unter den gegebenen Randbedingungen einfach und kosteneffizient implementierbar sind. Je nach Erfahrung des Gebäudebetreibers und vorhandener Software-Hardware-Infrastruktur sind prädiktive, optimierte Regler jedoch noch wenig praktikabel im Anwendungsfall, da sie ein genau-

es Modell der Anlage und aufwändige Hard- und Softwaretechnik erfordern und schwierig zu implementieren sind. Für die praktische Umsetzung im Gebäudebetrieb sind einfache regelbasierte, aber gleichzeitig auch prädiktive Betriebsstrategien praktikabler. Ziel eines Arbeitspaketes war daher, auf Grundlage optimierter prädiktiver Betriebsstrategien Regeln abzuleiten, die in Standardreglern umsetzbar sind. Aufgrund der Vielzahl an komplexen Zusammenhängen zwischen den Eingangsgrößen und deren Einfluss auf die Systemdynamik und die unterschiedlichen Zielstellungen wurden dazu automatisierte Methoden aus der Statistik (Mustererkennung) und des Maschinellen Lernens (Entscheidungsbäume, Neuronale Netze) angewandt. Bevor die neuartigen netzdienlichen Wärmepumpenbetriebsstrategien, sowohl modellprädiktive, als auch abgeleitete Regeln, im Gebäude implemen-

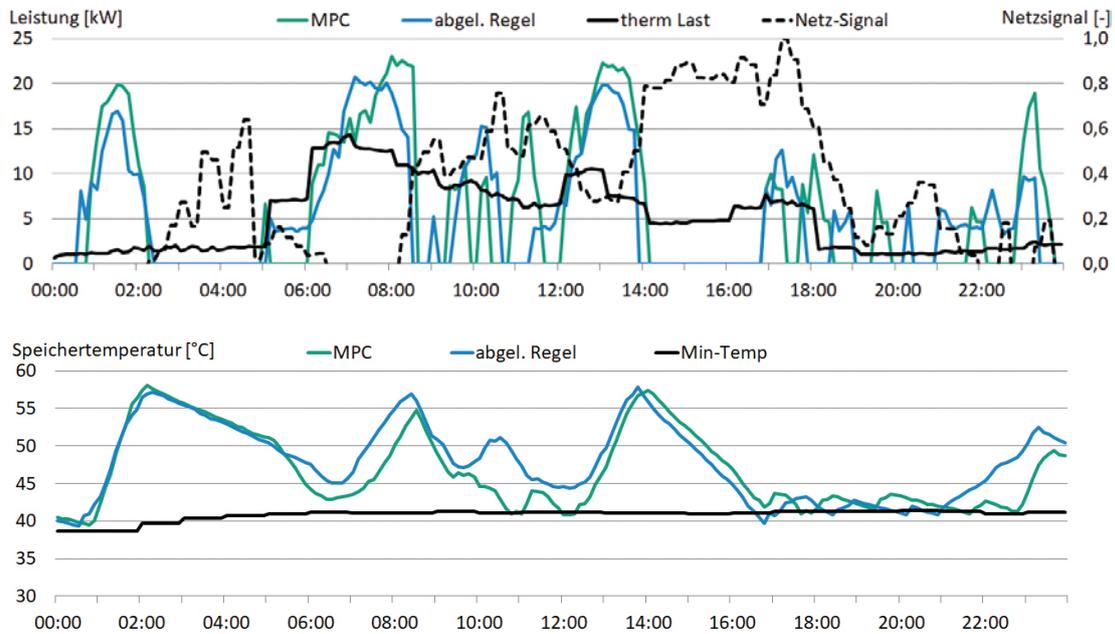


Abb. 8.6-3: HIL-Messung netzdienliche Wärmepumpenregelung (MPC in grün, abgeleitete Regeln in blau, Netzsignal und emulierter Gebäudeheizbedarf schwarze Linie/gepunktet im oberen Diagramm, Speichersolltemperatur im unteren Diagramm in schwarz)

Tabelle 8.6-2: Vergleich verschiedener Wärmepumpenregelungen im HIL-Versuch

	MPC $T_{sp,max}=62^{\circ}C$	MPC $T_{sp,max}=55^{\circ}C$	Standard Regelung	Abgeleitete Regelung
Energieverbrauch	139,6kWh _{th} 43,3kWh _{el}	138,2kWh _{th} 38,0kWh _{el}	124,9kWh _{th} 31,1kWh _{el}	131,6kWh _{th} 40,8kWh _{el}
Tagesarbeitszahl	3,5	3,8	4,0	3,3
GSC_{abs}	0,24	0,51	1,20	0,46

8.6.4 Zusammenfassung und Ausblick

Die Ergebnisse zeigen, dass ein netzdienlicher Wärmepumpenbetrieb mit optimierten, prädiktiven Reglern möglich ist und oftmals die Energieeffizienz des getesteten Systems gegenüber der nicht-optimierten und nicht-vorausschauenden Standardregelung verbessert.

Um die energiewirtschaftlichen Voraussetzungen für eine erfolgreiche Umsetzung in die Praxis zu bewerten, wurden im Verbundprojekt umfangreiche Simulationen basierend auf ausgewählten Geschäftsmodellen und unterschiedlichen Strompreisszenarien durchgeführt. Die Berechnungen zeigen eine Gemeinsamkeit: Das finanzielle Potenzial eines netzdienlichen Betriebes in Bezug auf Kosteneinsparung, verglichen beispielsweise mit einem konventionellen System, ist im Allgemeinen gering. Derzeit beschränkt sich der Anreiz zur Flexibilisierung auf eine Erhöhung von Eigenverbrauch von lokal erzeugtem (PV-)Strom. Lediglich eine maßgebliche Änderung des regulatorischen Rahmens, z. B. durch eine höhere Förderung oder durch eine Flexibilisierung aktuell unflexibler Endverbraucherpreisbestandteile, könnte dazu führen, dass sich die flexiblen Gebäudeversorgungssysteme rentieren.

Auch die Haupterkenntnis der durchgeführten Nutzer- und Betreiberumfragen von ca. 100 Nichtwohngebäuden [4] ist es, dass der Umsetzung eines netzdienlichen Gebäudeanlagenbetriebs derzeit noch fehlende ökonomische Anreize entgegenstehen. Es ist eine regulative Umgestaltung des Strommarktes notwendig, um den Markt für Flexibilitätsprodukte auf den verschiedenen Netzebenen zu stärken und

neue Handlungsoptionen für Energiedienstleister zu eröffnen. Diese könnten es den Unternehmen ermöglichen, finanzielle Anreize und Spielräume – etwa über variable Stromtarife – anzubieten. Andererseits ergab die Umfrage aber auch, dass im Kontext der Energiewende die Handlungs- und Investitionsbereitschaft der Unternehmen besteht, eine verantwortungsbewusste Rolle in der Transformation des Energiesystems zu übernehmen, die nicht immer an hohe Amortisationserwartungen gekoppelt ist. Diese Motivation kann weiter gestärkt werden, wenn Politik und Energieversorger und -anbieter die Rahmenbedingungen verbessern, z. B. durch Steigerung der öffentlichen Wahrnehmung von Netzdienlichkeit als wichtige Rolle in der Energiewende. Mit entsprechendem Wissens- und Kompetenzaufbau kann gezeigt werden, dass die existierenden Sorgen nach Kontrollverlust über die eigenen Anlagen oft unbegründet sind.

Das Projekt FlexControl wurde unter dem Förderkennzeichen 03ET1359A-E mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie gefördert.

Literatur:

- [1] Bachseitz, M., Koenigsdorff, R., Modellprädiktiver, netzdienlicher Betrieb von Kälteanlagen in Supermärkten, Tagungsband IBPSA, BauSIM Karlsruhe, 2018
- [2] Bachseitz, M., Pfeiffer, D., Koenigsdorff, R., Becker, M., Studie zum technischen Flexibilitätspotential von Kälteanlagen für das elektrische Lastenmanagement mittels prädiktiver Optimierung, GI - Gebäudetechnik in Wissenschaft und Praxis, 2019
- [3] Frison, L., Kleinstück, M., Engelmann, P., Model-predictive control for testing energy flexible heat pump operation within a Hardware-in-the-Loop setting, IOP's Journal of Physics: Conference Series 1343, 2019
- [4] Gölz, S., Pilhofer, T., Goldbach, K., Engelmann, P., Studie zu Netzdienlichkeit zeigt: Unternehmen des GHD-Sektors wollen Energiewende aktiv mitgestalten, Proceedings, Zukünftige Stromnetze, Berlin, 30. - 31. Januar 2019
- [5] Kalz D., Herkel S., Klein K., Winiger S. Energetische und energiewirtschaftliche Analyse von Wärmepumpen für die Wärme- und Kälteversorgung von Nichtwohngebäuden.
- [6] EnOB-Symposium 2014 „Energieinnovationen in Neubau und Sanierung“, Essen Deutschland, Zeche Zollverein, 20.-21.3.2014.
- [7] Klein, K., Kalz, D., Herkel, S., Netzdienlicher Betrieb von Gebäuden: Analyse und Vergleich netzbasierter Referenzgrößen und Definition einer Bewertungskennzahl, Bauphysik 36(2):49-58, 2014
- [8] Klein, K., Langner, R., Kalz, D., Herkel, S., Henning, H.-M., Grid support coefficients for electricity-based heating and cooling and field data analysis of present-day installations in Germany, Applied Energy 162: 853-67,

2016

- [9] Klein, K., Herkel, S., Henning, H.-M., Felsmann, C., Load shifting using the heating and cooling system of an office building: quantitative potential evaluation for different flexibility and storage options, Applied Energy 203: 917-37, 2017

Kontakt:

Fraunhofer ISE, Gebäudesystemtechnik

Dr.-Ing. Peter Engelmann
peter.engelmann@ise.fraunhofer.de

Dr. rer. nat. Lilli Frison

TU Dresden, Institut für Energietechnik

Prof. Dr.-Ing. Clemens Felsmann
clemens.felsmann@tu-dresden.de

Dipl.-Ing. Juliane Schmidt

Hochschule Biberach
Institut für Gebäude- und Energiesysteme

Prof. Dr.-Ing. Roland Koenigsdorff
koenigsdorff@hochschule-bc.de

Dipl.-Ing. (FH) Michael Bachseitz, M.Sc.

Kontakt:

Hochschule Ruhr-West,
Institut Energiesysteme und Energiewirtschaft

Prof. Dr.-Ing. Marcus Rehm
Marcus.Rehm@hs-ruhrwest.de

Jan-Philipp Kitzig, M.Eng.

Robert Bosch GmbH
Energy Management (CR/AEB3),

Dr.-Ing. Francesco Massa Gray
Francesco.MassaGray@de.bosch.com

Dr.-Ing. Jan Gall

8.7 Solare Wärmenetze mit saisonalen Multifunktionswärmespeichern

Im Forschungsvorhaben futureSuN¹ wird die Zukunftsfähigkeit solarunterstützter Nahwärmeversorgungskonzepte (SuN) mit saisonaler Wärmespeicherung analysiert. Hierzu werden, unter Berücksichtigung von jahrzehntelangen Betriebserfahrungen mit den ersten Pilotanlagen, in Simulationsstudien innovative Energieversorgungskonzepte für Quartiere untersucht, die auf einer multifunktionalen Nutzung saisonaler Wärmespeicher basieren.

8.7.1 Technologieübersicht

In Deutschland wurden in den Jahren 1995 – 2007 elf Anlagen mit saisonaler Wärmespeicherung als Pilotprojekte realisiert, siehe Abbildung 8.7-1. Bei diesen Anlagen wurden vier Bauformen für große saisonale Wärmespeicher bzw. Langzeitwärmespeicher (LZWSp) erprobt und vermessen [1]: Behälter- bzw. Tankspeicher, Heißwasser-Erdbeckenspeicher, Aquiferspeicher und Erdsondenspeicher, siehe Abbildung 8.7-2.

Behälter- bzw. Tankspeicher werden meist als zylindrische, allseitig wärmegegedämmte Stahl- oder Betonbehälter ausgeführt. Den Vorteilen des flexiblen Betriebes und den hohen Be- und Entladeleistun-

gen stehen jedoch relativ hohe Investitionskosten gegenüber. Im drucklosen Betrieb sind Speichertemperaturen bis ca. 90 °C möglich. Druckspeicher werden, je nach Druckniveau, auch mit bis zu 120 °C betrieben.

Heißwasser-Erdbeckenspeicher können am einfachsten realisiert werden, wenn ein weicher selbststehender Erdboden ohne Grundwasser vorliegt. Entscheidend ist die wasserdichte und langzeitstabile Auskleidung des Beckens, bis max. 85 °C sind HDPE-Folien geeignet. Die Decke und der obere Bereich der Wände sollten wärmegegedämmt werden. In den letzten Jahren wurden insbesondere in Dänemark sehr große Erdbeckenspeicher mit einer sog. schwimmenden Abdeckung realisiert, z. B. in Marstal mit 75.000 m³ Volumen.

Aquiferspeicher können realisiert werden, wenn im Erdreich eine in sich abgeschlossene und mit Wasser gesättigte Gesteinsschicht vorhanden ist. Die Wärmespeicherung erfolgt durch Einleitung von warmem und Entnahme von kaltem Wasser mittels Brunnen. Die maximalen Betriebstemperaturen der ausgeführten Aquiferspeicher reichen von ca. 25 bis 100 °C. Probleme können durch verstopfte Brunnenfilter, Ablagerungen in Rohrleitungen sowie unkontrollierte Wasserströme im Erdreich entstehen. Erdsondenspeicher nutzen das Erdreich als Speichermedium. Die Ein- und Ausspeicherung erfolgt

¹ futureSuN: „Analyse, Bewertung und Entwicklung zukunftsfähiger Anlagenkonzepte für solare Nahwärmeanlagen mit saisonaler Wärmespeicherung“. Projektpartner: Institut für Gebäudeenergetik, Thermotechnik und Energiespeicherung, Universität Stuttgart. Steinbeis Innovationszentrum Energie-, Gebäude und Solartechnik, Stuttgart. Steinbeis Innovationszentrum energie+, Braunschweig. Bayerisches Zentrum für Angewandte Energieforschung, Garching. Gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. FKZ: 0325897A, B und C

über eine Anordnung von vertikalen Erdsonden. Diese werden entweder gebohrt oder bei entsprechend weichem Erdboden gerammt. Günstig sind tonige, lehmige Böden ohne Grundwasserströmungen oder Fels. Die Rohrabstände und Sondentiefen sind primär von den geologischen Gegebenheiten

abhängig. Die maximalen Betriebstemperaturen betragen bis zu 80 °C.



Abb. 8.7-1: Seit 1995 in Deutschland errichtete SuN-Anlagen mit saisonaler Wärmespeicherung [2]

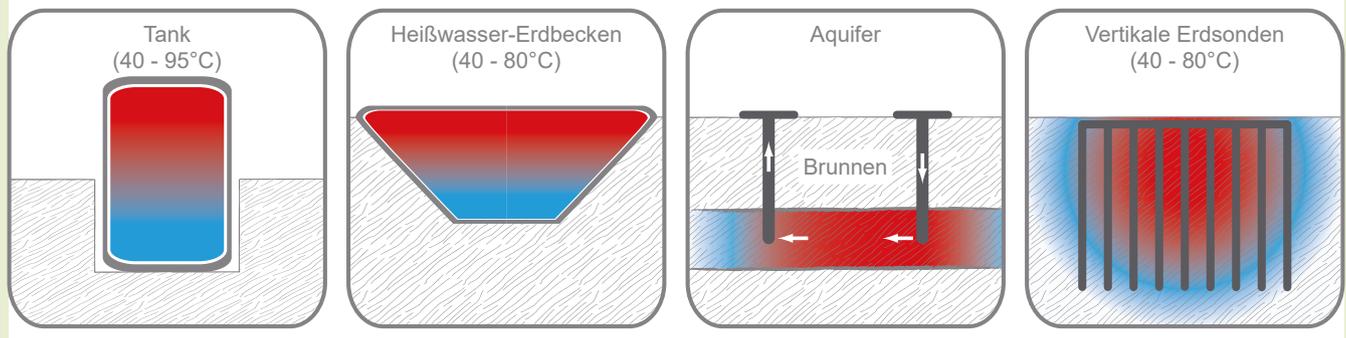


Abb. 8.7-2: Bauformen saisonaler Wärmespeicher [2]

8.7.2 Langzeitauswertung

Im Projektverlauf wurden Daten von neun SuN-Bestandsanlagen ausgewertet. Trotz der individuellen Herausforderungen aufgrund der experimentellen Natur der Pilotanlagen arbeiten die Speicher

als zentrales Element der Energieversorgung über Jahrzehnte sehr zuverlässig. In Abbildung 8.7-3 ist erkennbar, dass der Speichernutzungsgrad in der Anlage München Ackermannbogen über einen langen Zeitraum stabil bleibt.

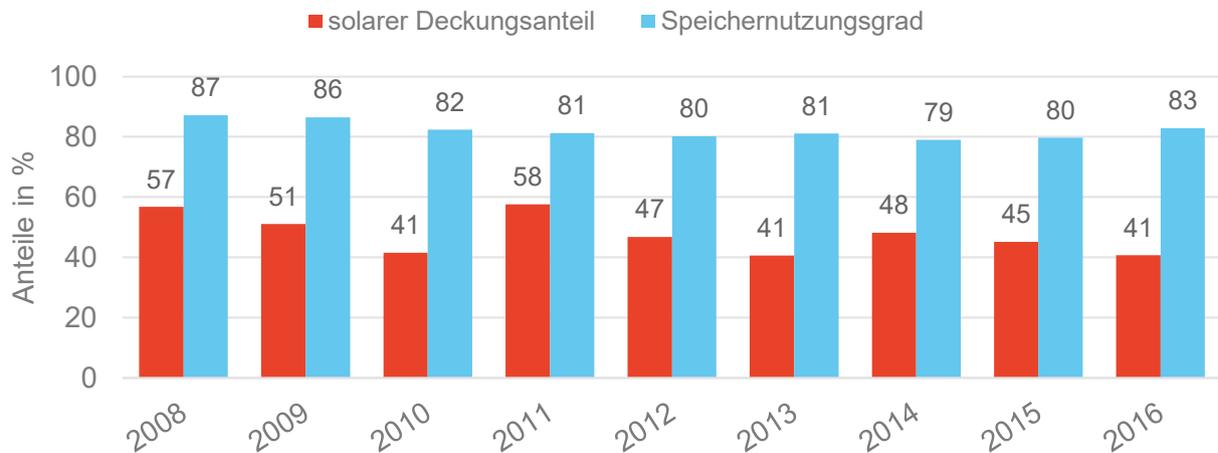


Abb. 8.7-3: Langzeitauswertung der SuN-Anlage München Ackermannbogen [2]

8.7.3 Innovative Konzepte

Um die Technologie der solarunterstützten Nahwärmeversorgungskonzepte mit saisonaler Wärmespeicherung weiter zu verbreiten, sind innovative Konzepte erforderlich. Im Projekt futureSuN werden dazu von kalten Nahwärmenetzen, über multivalent Systeme mit Wärme- und Kältebereitstellung hin zu Sektorenkopplung mit Power-to-X Technologien wie Photovoltaik und Wärmepumpe unterschiedliche Konzepte untersucht, welche die verschiedenen Speicherbauformen mit ihren spezifischen Vor- und Nachteilen nutzen. Im Folgenden wird exemplarisch ein Konzept beschrieben.

8.7.3.1 Motivation

Heute ist unumstritten, dass Wärme- und Stromwende gemeinsam angegangen werden müssen und die Kopplung dieser beiden Sektoren eine entscheidende Relevanz hat. So sollen z. B. Wärmepumpen bis 2030 ein Viertel des Gebäudewärmebedarfs decken [3]. Dafür ist ein Ausbau der Erneuerbaren Energien (EE) erforderlich. Im Jahr 2018 wurden ca. 39 % der Jahresstrommenge von 536 TWh aus EE erzeugt [4]. Um eine Reduktion der CO₂-Emissionen bei der Stromerzeugung um 85 % zu erreichen, muss bis zum Jahr 2050 jedoch noch mehr als das Dreifache der heutigen EE-Leistung in Form von Windkraft und Photovoltaik (PV) installiert werden [5]. Trotz steigendem Bedarf durch die Fokussierung auf Strom als Primärenergieträger und E-Mobilität ist zu erwarten, dass ohne Energiespeicher langfristig große Mengen von Erträgen aus EE ungenutzt blei-

ben. Während Power-to-Gas ebenfalls einen signifikanten Beitrag leisten wird, kommt es letztendlich auf einen Mix der geeigneten Technologien an, um Überschüsse zu nutzen und auf das volatile EE-Angebot zu reagieren.

Bei der Energieversorgung von Stadtquartieren ermöglicht die Speicherung in Form von Wärme günstige große Speicherkapazitäten. Die Sektorenkopplung kann auf innovative Weise mit Power-to-Heat (P2H) durch die Kombination von Wärmenetzen, PV, Wärmepumpen (WP) und LZWSp umgesetzt werden. Letztere sind seit über 20 Jahren eine bewährte Technologie zum saisonalen Ausgleich.

8.7.3.2 Methodik

Die Potentiale eines solchen Energieversorgungssystems werden mit Jahressimulationen in der Software TRNSYS untersucht. Als Grundlage wird ein Neubauquartier mit ca. 1.000 Wohneinheiten (WE) angenommen. Der Wärmedämmstandard der Gebäude orientiert sich an der EnEV 2016, da die Investition in EE einer übermäßigen Wärmedämmung vorzuziehen ist [6]. Der Strombedarf orientiert sich an Kategorie C des Stromspiegels Deutschland, bei drei Einwohnern pro Wohneinheit. Die Wärmeversorgung der Gebäude erfolgt mittels eines Wärmenetzes mit einer Anschlussleistung von ca. 4 MW_{th} und 6,6 km Trassenlänge bei 75 °C Vorlauf- und 45 °C Rücklauf-temperatur.

8.7.3.3 Energieversorgungskonzept

Ziel der zukunftsfähigen Energieversorgung mit dem Konzept „P2H Quartier“ ist eine Reduktion der Treibhausgasemissionen auf ein nahezu klimaneutrales Niveau, welches durch einen möglichst hohen regenerativen Eigenversorgungsgrad (EVG) erreicht werden soll. Der EVG gibt an, zu welchem Anteil der gesamte Strom- und Wärmebedarf des Systems nicht nur bilanziell, sondern direkt aus lokalen regenerativen Energien gedeckt wird.

Grundlage der Energiegewinnung ist die Installation von PV auf den Dachflächen, deren Ertrag mit oberster Priorität den Strombedarf der Nutzer und der Gebäude deckt. Wie in Abbildung 8.7-4 dargestellt,

sind die Gebäude in einem Arealnetz zusammengeschlossen und können den Strom so untereinander und zentral für P2H nutzbar machen. Die Wandlung von Strom in Wärme wird durch Luft-Wasser-WP realisiert, die als Kaskade bis zu 90 °C im Vorlauf generieren. Das hohe Temperaturniveau ist gewünscht, um mit dem zentralen LZWSp eine möglichst große Kapazität bereitstellen zu können. Der LZWSp in Behälterbauweise speist Wärme in das Nahwärmenetz ein. Die WP kann auch mit Netzstrom betrieben werden. Dies wird jedoch erst in Zukunft dann ökologisch und ökonomisch zielführend sein, wenn die CO₂-Emissionen der Stromerzeugung und Preise deutlich gesunken sind.

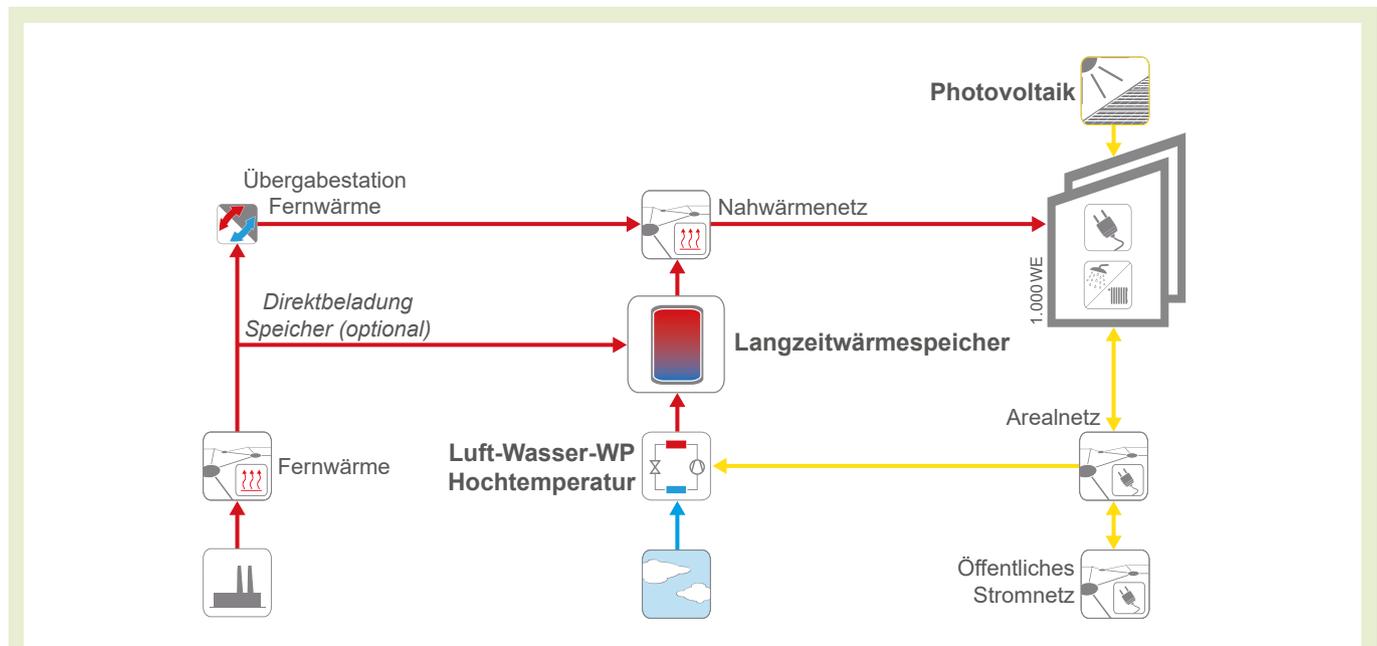


Abb. 8.7-4: Schema des Energieversorgungskonzeptes „P2H Quartier“ [2]

8.7.3.4 Dimensionierung

Die oben dargestellte Anlage wird auf einen EVG von 50 % ausgelegt. Pro WE wird mit ca. 8 kW_p das vorhandene Flächenpotential an den Gebäuden zur PV-Installation erschlossen. Durch den LZWSp mit 15.000 m³ Volumen steht ein nutzbarer Energieinhalt von ca. 700 MWh pro Ladezyklus zur Verfügung, um die thermische Leistung der WP aufzunehmen.

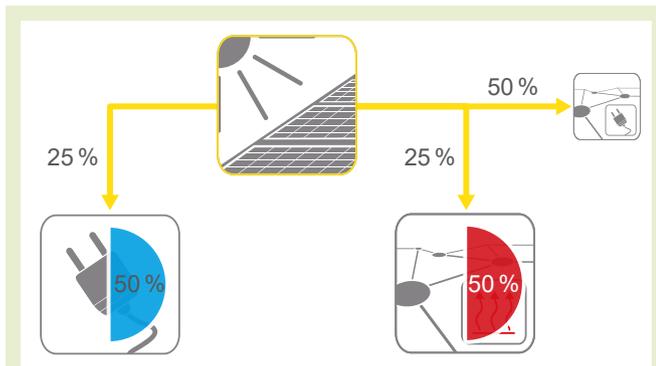


Abb. 8.7-5: Jahresbilanz der Nutzung des PV-Stroms für Strom und Wärme [2]

Abbildung 8.7-5 zeigt die direkte Nutzung des PV-Ertrags und die Deckung der Bedarfsanteile. Jeweils 25 % stehen unter Berücksichtigung von Lastprofilen in den dynamischen Simulationen für den Strombedarf bzw. die Wärmeversorgung zur Verfügung, somit werden 50 % solar gedeckt. Um die saisonale Verschiebung zu untersuchen, sind die monatlichen Energiebilanzen für die Strom- und Wärmeseite in Abbildung 8.7-6 bzw. Abbildung 8.7-7 dargestellt. Im Sommer sind weiterhin große Stromüberschüsse vorhanden. Soll deren Eigenutzung im Quartier gesteigert werden, sind Wär-

mepumpe und Speicher größer zu dimensionieren oder der Strombedarf beispielsweise durch erneuerbar betriebene E-Mobilität zu erhöhen.

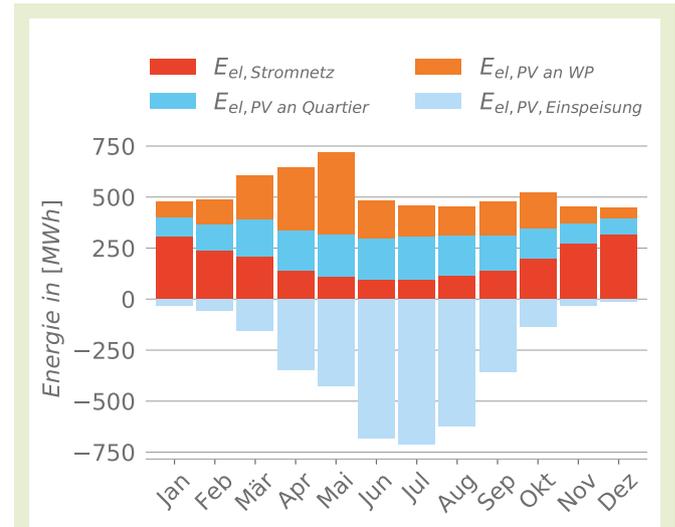


Abb. 8.7-6: Monatliche Strombilanz [2]

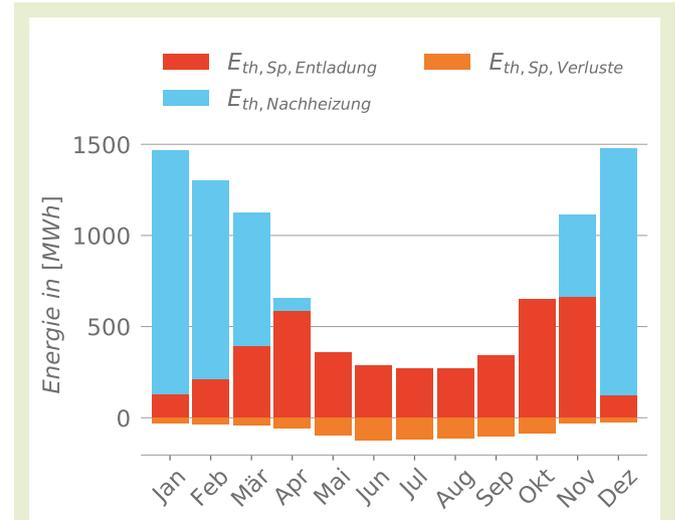


Abb. 8.7-7: Monatliche Wärmebilanz [2]

Die ökologische und wirtschaftliche Bewertung fließt durch eine Minimierung der CO₂-Vermeidungskosten in die Optimierung der Dimensionierung ein. Die Details sind im Abschlussbericht des Projekts futureSuN veröffentlicht [2].

8.7.3.5 Bewertung

Zur ökologischen Bewertung zeigt Abbildung 8.7-8, wie sich die CO₂-Emissionen der Energieversorgung mit P2H im Vergleich zu einem Referenzsystem mit konventioneller Fernwärme zusammensetzen. Dabei sind auch die Emissionen aus der Herstellung der Anlagenkomponenten (PV, LZWSp, etc.) berücksichtigt. Die Emissionen können um 65 % von 1,6 auf 0,57 t_{CO2}/(Pers.a) gesenkt werden, womit eine nahezu klimaneutrale Energieversorgung möglich wird. Genauso wie der ökologische Nutzen ist

auch die technische Umsetzbarkeit gegeben, da alle Komponenten am Markt verfügbar sind.

Die Vermeidung von CO₂-Emissionen ist jedoch mit Kosten verbunden. Die Notwendigkeit von Klimaschutzmaßnahmen wird in Fachkreisen nicht bestritten, allerdings sind dazu zusätzliche Investitionen erforderlich. Dementsprechend liegen die primären Herausforderungen zur Umsetzung in der Wirtschaftlichkeit. Abbildung 8.7-9 zeigt die Zusammensetzung der jährlichen Kosten und Erlöse entsprechend dem folgendem Betreibermodell: Der Betreiber investiert in alle erforderlichen Komponenten, um die Gebäude mit Wärme und PV-Strom zu versorgen. Die zusätzlich erforderliche Wärme wird vom externen Fernwärmenetz eingekauft. Die Erlöse ergeben sich aus dem Verkauf von Wärme und Strom an die Gebäude und der Einspeisung ins öffentliche Stromnetz. Unter diesen Voraussetzun-

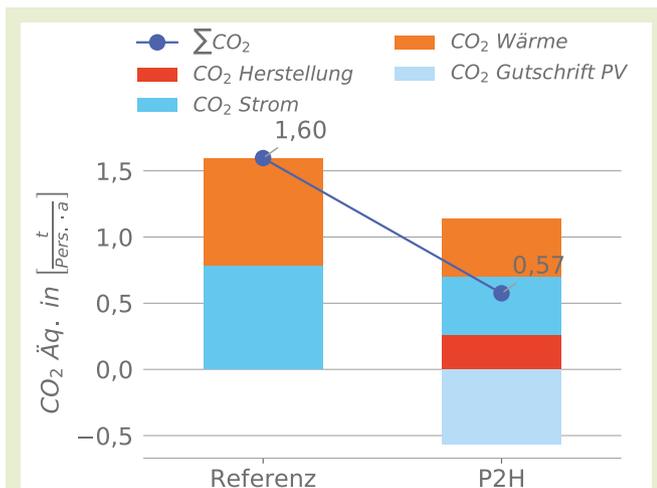


Abb. 8.7-8: Ökologische Bewertung anhand CO₂-Emissionen

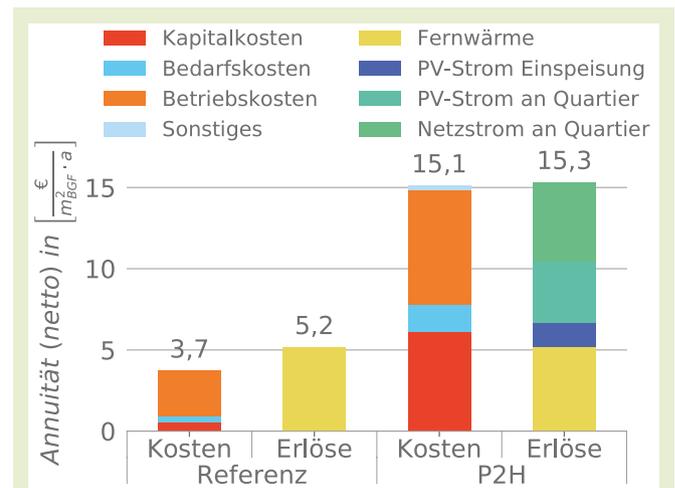


Abb. 8.7-9: Flächenspezifische Annuitäten (netto) bzgl. 150.000 m²_{BGF}

gen ist das System wirtschaftlich tragfähig, jedoch fällt die Gesamtannuität geringer aus als beim Referenzsystem. Aus den damit entgangenen Gewinnen ergeben sich jährliche CO₂-Vermeidungskosten in Höhe von ca. 60 €/t_{CO₂}. Die laut Klimapakete geplanten CO₂-Bepreisungen [7] mit einem Anstieg von 25 €/t_{CO₂} in 2021 auf 55 €/t_{CO₂} in 2025 sind noch nicht einkalkuliert, sie werden zweifelsfrei einen positiven Beitrag leisten.

Der Verkauf von Wärme und Strom aus einer Hand sorgt dafür, dass das vorliegende Konzept wirtschaftlich tragfähig wird. Voraussetzung und größte regulatorische Hürde ist dabei die Umsetzung eines Arealnetzes.

8.7.4 Zusammenfassung

Die Herausforderung der Energiewende erfordert u. a. den massiven Ausbau von Erneuerbaren Energien zur Erzeugung von Strom und Wärme, wie Photovoltaik, Windkraft und Solarthermie. Durch die Installation im Quartier lässt sich der Ertrag am besten nutzen und durch saisonale Speicherung auch in der Heizperiode. Mit dem Konzept des „P2H-Quartiers“ können signifikante Reduzierungen bei den CO₂-Emissionen durch die Energieversorgung erreicht werden, ca. 2/3 im gezeigten Beispiel. Wenn zukünftig „grüner“ Netzstrom genutzt wird, können weitere CO₂-Emissionen vermieden werden. Darüber hinaus präsentieren sich ergänzende Nutzungsformen für den LZWSp, wie z. B. die Flexibilisierung des Betriebs von angeschlossenen Fernwärmenetzen und die Bereitstellung von negativer Regelenergie.

In Kombination mit entsprechenden Fördermodellen ergeben sich wirtschaftlich tragfähige und zukunftsorientierte Energieversorgungskonzepte, die einen wertvollen Beitrag zum Klimaschutz leisten.

Literatur:

- [1] Fisch, M. N.; Möws, B.; Zieger, J.: Solarstadt – Konzepte, Technologien, Projekte. ISBN 3170154184. Kohlhammer, Stuttgart, 2001.
- [2] SIZ energie+; SIZ EGS; IGTE; ZAE Bayern: futureSuN – Analyse, Bewertung und Entwicklung zukunftsfähiger Anlagenkonzepte für solare Nahwärmanlagen mit saisonaler Wärmespeicherung, Braunschweig 2020.
- [3] Agora Energiewende: Wärmewende 2030 – Schlüsseltechnologien zur Erreichung der mittel- und langfristigen Klimaschutzziele im Gebäudesektor, Berlin 2017.
- [4] Bundesnetzagentur: SMARD Strommarktdaten – Die Informationsplattform der Bundesnetzagentur über den deutschen Strommarkt, Bonn, 2019.
- [5] Henning, H.-M.; Palzer, A.: Was kostet die Energiewende? – Wege zur Transformation des deutschen Energiesystems bis 2050. Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE, Freiburg 2015.
- [6] Fisch, M. N.: Gutachten zur Verschärfung der EnEV und Zusammenlegung EnEV / EEWärmeG für Wirtschaftsimmobilien. SIZ Energie-, Gebäude- und Solartechnik, Stuttgart 2017.
- [7] Bundesregierung: Vermittlungsausschuss empfiehlt höheren Einstiegspreis – Grundlage für CO₂-Preis steht, Berlin, 2019.

Kontakt:

Braunschweig
Steinbeis-Innovationszentrum energie+

Univ.-Prof. Dr.-Ing. M. Norbert Fisch
manfred-norbert.fisch@stw.de

Dipl.-Ing. Thomas Wilken
thomas.wilken@stw.de

Joris Zimmermann, M.Sc.
joris.zimmermann@stw.de

Universität Stuttgart
Institut für Gebäudeenergetik, Thermotechnik und
Energiespeicherung (IGTE)

Dr.-Ing. Harald Drück
harald.drueck@igte.uni-stuttgart.de



09

DIGITALE
WERKZEUGE

DIGITALE WERKZEUGE

9.1 Motivation und Hintergrund der Studie

9.2 Wissenschaftliche Begleitforschung

9.3 Methodik

9.4 Terminologie

9.5 Ergebnisse

9.6 Zusammenfassung und Ausblick

9.7 Qualitätssicherung von Simulationsprogrammen

9.8 Softwarequalität in Energieprojekten

9.9 Demonstration integraler Prozessketten
i. A. der Quartierssimulation



Im Rahmen der Wissenschaftlichen Begleitforschung zu Forschungsvorhaben im Bereich „Energie in Gebäuden und Quartieren“ sind mehr als 900 Projekte hinsichtlich ausgewählter Themen ausgewertet worden. Den Schwerpunkt der hier betrachteten Tiefenbohrung bilden digitale Werkzeuge und softwarebasierte Lösungsansätze



9.1 Motivation und Hintergrund der Studie

Im Rahmen der Wissenschaftlichen Begleitforschung zu Forschungsvorhaben, die seitens des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi) im Bereich „Energie in Gebäuden und Quartieren“ zur korrespondierenden Forschungsinitiative Energiewendebauen gefördert werden, sind mehr als 900 Projekte hinsichtlich ausgewählter Themen ausgewertet worden. Bei der wissenschaftlichen Querschnittsforschung handelt es sich um eine Methodik zur Analyse von Forschungsvorhaben auf der übergeordneten Ebene. Das resultierende Ergebnis liefert einen verbesserten Einblick in das nationale Forschungsgeschehen. Den Schwerpunkt dieses Artikels bilden digitale Werkzeuge und softwarebasierte Lösungsansätze im Kontext Energie in Gebäuden und Quartieren. Neben einer eindeutigen terminologischen Abgrenzung werden die querschnittsübergreifende Relevanz von Tool- und Softwareentwicklungen im Rahmen von Forschungsprojekten, eine Typologie von softwarebasierten Lösungsansätzen, eine Tendenz zur Multi-Skalen Modellierung, die programmiertechnische Umsetzung, Lizenzierungsmodelle und das digitale Ökosystem der Anwendung im Rahmen dieser Querschnittsanalyse betrachtet.

Um die Energiewende und die Ziele zum Erreichen eines nahezu klimaneutralen Gebäudebestands bis zum Jahr 2050 sowie zur drastischen Reduktion des Energiebedarfs zu unterstützen, werden im Rahmen des Energieforschungsprogramms der Bundesregierung zahlreiche Forschungsvorhaben von Universitäten und Hochschulen, Forschungs-

einrichtungen und Unternehmen gefördert. Unter dem Themenzusammenschluss „Energieoptimierte Gebäude und Quartiere“ fördert das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) die Bereiche Energieoptimiertes Bauen (EnOB), Niedertemperatur-Solarthermie, Thermische Speicher, Forschung für energieeffiziente Wärme- und Kältenetze (EnEff:Wärme), Solarisierung von Wärmenetzen sowie Forschung für die energieeffiziente Stadt (EnEff:Stadt) [1].

Die Förderung betrachtet damit Effizienzpotenziale von Gebäuden und Quartieren, technische Innovationen und Technologien, die in Demonstrationsvorhaben umgesetzt werden. Ein wichtiger Aspekt ist hierbei der Fokus auf systemische Ansätze – im Gegensatz zu Einzellösungen [2]. Systemische Ansätze sind vor dem Hintergrund von vernetzten Gebäude- und Quartierskonzepten, Konzepten, die die Rolle der Nutzer aktiv einbeziehen, oder im Kontext der Sektorkopplung von Bedeutung. Ziel dieses Beitrages ist es, vor diesem Hintergrund den vorhandenen Status Quo der bestehenden Forschungslandschaft aus dem Blickwinkel von digitalen Werkzeugen zu analysieren.

Der Entwicklungsprozess von digitalen Werkzeugen im Rahmen dieser Forschungsprojekte wurde bereits häufig durch ein breites Fachpublikum aus Wissenschaft und Praxis diskutiert [2], [3], [4]. Neben einem mangelnden Bezug zu den Anwendern und damit einhergehend zu verbesserndem Forschungstransfer der entwickelten digitalen Werkzeuge in die Praxis wurden auch die zu verbessernde Transparenz und Übersicht über die aktuellen Entwicklungen im Rahmen von Forschungsprojekten

thematisiert. Letzteres adressiert einen Forschungsbedarf, dem mittels Querschnittsmethodik begegnet werden kann. Auf der Grundlage einer seitens der wissenschaftlichen Begleitforschung erarbeiteten umfassenden Datenlage zu den Entwicklungen von softwarebasierten Lösungsansätzen und Anwendungen von digitalen Werkzeugen soll im Rahmen des vorliegenden Beitrags eine Übersicht über die Forschungsprojekte geschaffen werden. Die Auswertungen basieren auf einer Datenerhebung mittels eines Online-Fragebogens der Begleitforschung, bei dem insgesamt 763 Forschungsprojekte angeschrieben wurden. Von den angeschriebenen Projekten haben 536 Teil- und Verbundprojekte an der Datenerfassung teilgenommen.

9.2 Wissenschaftliche Begleitforschung

Um eine inhaltliche Vernetzung und einen bereichsübergreifenden Informationsaustausch zu gewährleisten, wurden die untereinander abhängigen Förderinitiativen in dem übergeordneten Forschungsnetzwerk EWB zusammengefasst. Zur Unterstützung der Vernetzung aller vom BMWi geförderten Projekte im Forschungsbereich Energie in Gebäuden und Quartieren wurde die Wissenschaftliche Begleitforschung (BF) initiiert. Das interdisziplinär aufgestellte Forschungsteam bestehend aus zwei Instituten der RWTH Aachen und drei Forschungsinstituten der Fraunhofer Gesellschaft ermöglicht durch eine breite und schwerpunktübergreifende Ausrichtung eine engere Verzahnung sämtlicher geförderter Projekte [5]. Neben der Identifikation und Formulierung von zentralen Forschungsfragestellungen, Technik-

scouting und Trendanalysen gehören u. a. projektübergreifende Auswertungen zu den Aufgabenbereichen der BF. Eine besondere Stellung im Rahmen dieser Forschungsprojekte nimmt die querschnittsübergreifende Entwicklung von softwarebasierten Lösungsansätzen und Anwendungen von digitalen Werkzeugen ein. Gegenwärtige Fragestellungen im Bereich von Gebäuden und Quartieren haben eine hohe Komplexität, weswegen die Entwicklung von digitalen Werkzeugen häufig zum Lösungsansatz der übergeordneten Forschungsfragestellung selbst wird. Insbesondere im Quartiersbereich sind auf dem Markt zur Bearbeitung der Fragestellungen keine digitalen Planungswerkzeuge verfügbar, womit eine Toolentwicklung notwendiger Bestandteil eines Vorhabens ist.

9.3 Methodik

Um eine effiziente Abfrage von Informationen zu ermöglichen und dennoch die Heterogenität von Forschungsprojekten hinreichend genau abbilden zu können, wurde durch das Konsortium eine themenübergreifende Datenerhebung mit einer impliziten Bedingungslogik entwickelt. Im Zuge dieser Informationsabfrage werden Projektleiter von Forschungsprojekten angeschrieben, die in den Sachbereich der Begleitforschung fallen, und gebeten, Informationen zu ihrem Verbund- oder Teilprojekt bereitzustellen. Diese Informationen werden über einen Online-Fragebogen erfasst und dienen später als Datengrundlage für diverse Analysen der Querauswertung und Tiefenbohrungen. Im Ergebnis sollen dadurch neue Fragestellungen für die Forschung

identifiziert und Einblicke in die Forschungslandschaft gewährt werden. Öffentlich zugängliche Projektinformationen sind zudem über die „Landkarte der Projekte“ im Internetportal EWB abrufbar.

Der Online-Fragebogen ist unterteilt in mehrere thematische Abfragen, die aus einer Einordnung der Forschungsschwerpunkte in Kategorien einen individuellen Abfrageverlauf ergeben. Unter den Kategorien werden relevante thematische Schwerpunkte zusammengefasst, wie beispielsweise Forschungsprojekte mit einem besonderen Augenmerk auf neue Technologien, Versorgungsnetze, Gebäude oder Quartiere. Die Entwicklung von softwarebasierten Lösungsansätzen und Anwendung von digitalen Werkzeugen nimmt dabei aus mehreren Gründen in der Umfrage eine Sonderstellung ein. Zum einen findet die Anwendung von digitalen Werkzeugen in einem Forschungsprojekt häufig parallel statt und zum anderen stellen neuentwickelte softwarebasierte Lösungsansätze nicht selten eine Verkettung und Kopplung bestehender Rechenkern- und -modelle dar, etwa über eine modell- oder datenseitige Kopplung [6].

Für eine repräsentative Darstellung der Forschungsaktivitäten muss daher zunächst in der Datenerhebung zwischen Anwendern und Entwicklern differenziert werden. Während die Abfrage von Metainformationen zu Anwendungen kategorieübergreifend erfolgt, bilden Entwicklungen von softwarebasierten Lösungsansätzen einen eigenen Forschungsschwerpunkt und werden daher in einer eigenständigen Kategorie zusammengefasst. Die Anwendung von digitalen Werkzeugen kann hingegen in jedem Forschungsprojekt zum zentralen

Gegenstand des Vorhabens werden, weswegen die Abfrage von Informationen unabhängig von der Kategorie und somit querschnittsübergreifend erfolgen muss. Forschungsprojekte, die sich beispielsweise mit der Nutzung thermischer Aquiferspeicher für die Wärme- und Kälteversorgung von Stadtquartieren beschäftigen, können genauso wie Forschungsprojekte, die robuste Planungsmethoden für Energiesysteme auf Netzebene entwickeln, im Zuge der Bearbeitung der Forschungsfragestellung auf digitale Werkzeuge zurückgreifen bzw. eine Entwicklung von softwarebasierten Lösungsansätzen anstreben.

Des Weiteren muss in der Datenerhebung berücksichtigt werden, dass Entwickler andere Metainformationen als Anwender benötigen. Dadurch, dass in der Anwendung digitale Werkzeuge zum Einsatz kommen, die sich bereits in einem fortgeschrittenen Entwicklungsstadium befinden, kann jede Anwendung trennscharf über den Namen abgefragt werden. Außerdem können oberflächlich weitere Informationen zum Anwender und zur Software erfasst werden. Dem gegenüber befinden sich die softwarebasierten Lösungsansätze in einer unvollendeten Entwicklungsstufe, weswegen zwar vertiefte softwarespezifische Informationen abgefragt werden können, dies jedoch nur auf übergeordneter Projektebene erfolgen und nicht trennscharf für jede Entwicklung im Verbundprojekt erfasst werden kann.

Die Ergebnisse, die im Folgenden vorgestellt werden, basieren auf dem ersten Durchlauf des Online-Fragebogens, bei dem die Projektleiter in der Bearbeitungszeit vom 9. Mai bis 7. August 2017 die

Möglichkeit hatten, den Fragebogen auszufüllen. Insgesamt wurden 763 Teilprojekte angeschrieben, wovon 277 Teilprojekte an der Umfrage teilgenommen haben. Insgesamt 83 Verbundprojekte hatten die Möglichkeit gewählt, ihren Fragebogen stellvertretend für alle Teilprojekte des jeweiligen Verbundvorhabens, koordiniert über einen Konsortialpartner, auszufüllen. Insgesamt wurden 406 Datensätze abgeschlossen, entsprechend 76 % der gesamten Rückmeldungen. Von den 130 fehlenden Antworten, entsprechend 24 % aller Forschungsprojekte, konnten 67 Teilprojekte einem Verbundpartner bzw. Verbundprojekt zugeordnet werden. Somit gibt es insgesamt von 63 Teilprojekten keine Daten, was einem Anteil von 10 % an allen 763 Teilprojekten entspricht. Aus Sicht der wissenschaftlichen Begleitforschung stellt dies eine sehr gute Ausgangsbasis für eine Auswertung dar.

9.4 Terminologie

Grundsätzlich soll an dieser Stelle zunächst kein Versuch unternommen werden, eine einheitliche Definition von digitalen Werkzeugen bzw. softwarebasierten Lösungsansätzen zu formulieren. Dennoch ist eine klare begriffliche Abgrenzung notwendig, um die Ergebnisse der Analyse im Kontext der zugrundeliegenden Terminologie reflektieren zu können. Allgemein handelt es sich bei Software um „Computerprogramme, Verfahren und möglicherweise damit verbundene Dokumentation und Daten zum Betrieb eines Computersystems“ [7]. Vor dem Hintergrund dieser Definition folgt eine kurze Diskussion und Abgrenzung der Begriffe „Software-

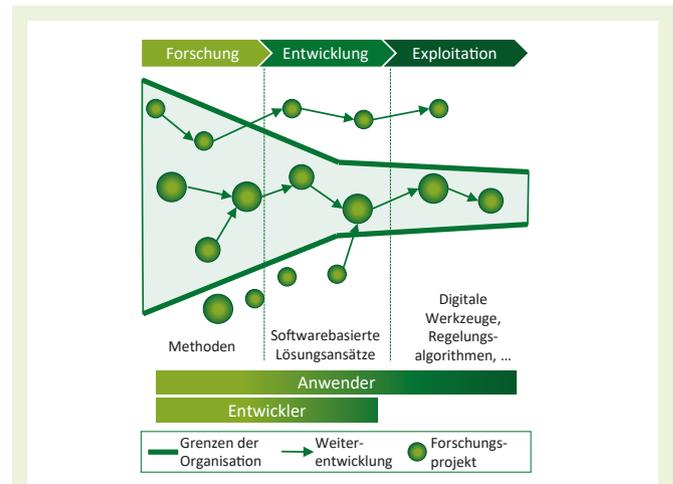


Abb. 9.4-1: Phasen des Entwicklungsprozesses

basierter Lösungsansatz“ und „Digitales Werkzeug“. In diesem Zusammenhang präsentiert Abbildung 9.4-1 den Entwicklungsprozess einer Organisation in der graphischen Struktur eines Trichters. Die Begriffe „Softwarebasierter Lösungsansatz“ und „Digitales Werkzeug“ lassen sich in erster Linie durch den aktuellen Status des Entwicklungsprozesses differenzieren. Softwarebasierte Lösungsansätze entstehen in der Entwicklungsphase und greifen auf bereits bestehende oder entwickelte Methoden aus der Grundlagenforschung zurück. Ins Verhältnis gesetzt zu Software, stellen softwarebasierte Lösungsansätze eine unvollendete und unausgereifte Entwicklungsstufe einer Software dar. Ähnlich zu Software sind softwarebasierte Lösungsansätze in ihrer Natur amorph und universell, sodass bereits bestehende Lösungsansätze kombiniert einen neuen Lösungsansatz ergeben. Die Fortentwicklung dieser Lösungsansätze findet in der betrachteten Stichprobe primär im Rahmen von Forschungspro-

jekten statt. Die Erhebung der Metadaten (Information über Zielgruppen, Anwendungsschwerpunkte, etc.) zu den Entwicklungen im Rahmen eines Forschungsprojektes werden wie bereits erwähnt über eine eigene Kategorie abgefragt.

Die Erzeugnisse aus der Entwicklung von softwarebasierten Lösungsansätzen können vielfältig sein. So kann das Ergebnis ein validiertes Wärmepumpen- bzw. Fensteröffnungsmodell, ein Regelungsalgorithmus zur prädiktiven Regelung von Wärme- und Kälteanlagen oder ein digitales Werkzeug zur Co-Simulation sein. In der aktuellen Analyse zu Anwendungen wird der Fokus auf digitale Werkzeuge gelegt, die sich insbesondere durch eine Benutzerschnittstelle (UI) abgrenzen und einen hohen Grad der Verbreitung bei Anwendern haben. Regelungsalgorithmen und Modelle, werden in der Datenerhebung in weiteren Kategorien zusammengefasst und finden nur implizit Eingang in diese Auswertung. Es können beispielsweise in MATLAB oder LabView entwickelte Modelle und Algorithmen verwendet worden sein, zu denen jedoch keine weiteren Informationen gegeben wurden.

9.5 Ergebnisse

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse aus der Auswertung der Datenerhebung von 2017 präsentiert und diskutiert.

9.5.1 Querschnittsübergreifende Relevanz von Entwicklungen

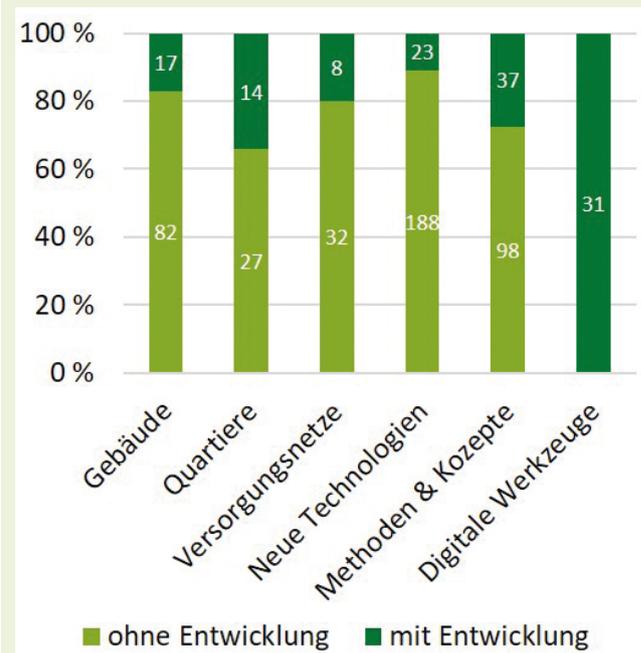


Abb. 9.5-1: Entwicklung von softwarebasierten Lösungen in Forschungsprojekten

Von den insgesamt 406 abgeschlossenen Datensätzen haben insgesamt 130 Verbund- oder Teilvorhaben angegeben, dass im Rahmen des Forschungsprojektes ein softwarebasierter Lösungsansatz entwickelt wird. Umgerechnet entspricht das knapp einem Drittel (32%) aller Forschungsprojekte und veranschaulicht in diesem Zusammenhang die themenübergreifende Relevanz von Entwicklungsaktivitäten in Forschungsprojekten.

Insgesamt beschäftigen sich 31 von 130 Teil- oder Verbundvorhaben mit der Entwicklung von digita-

len Werkzeugen ohne die explizite Angabe eines weiteren thematischen Schwerpunktes des Forschungsvorhabens. Dies bedeutet allerdings nicht, dass diese Forschungsprojekte keinen konkreten Anwendungsfall aus den genannten Themenfeldern behandeln (auf den Aspekt der Anwendung geht Abschnitt 9.5.5 ein, der einen breiten Perspektive über alle Themenfelder einnimmt). Ein Forschungsprojekt könnte Planungsinstrumente für zukünftige Niedertemperatur-Fernwärmeversorgungssysteme entwickeln und würde so im engen Zusammenhang zu dem Schwerpunkt Versorgungsnetz stehen, ohne beispielsweise konkret im Rahmen des Projektes ein Versorgungsnetz zu optimieren. Die restlichen 99 Verbund- oder Teilvorhaben verteilen sich auf fünf weitere Forschungsschwerpunkte und verdeutlichen, dass ein großer Anteil der Entwicklungen in das Umfeld eines anwendungsorientierten Forschungsprojekts integriert ist. Das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt entwickelt beispielsweise in einem Verbundvorhaben (03ET1405A) ein Messverfahren für schnelle und genaue energetische Analysen von Gebäudehüllen und Identifikation von erhöhten Energieverlusten. Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Entwicklung neuartiger softwarebasierter Lösungen einen signifikanten Anteil in der Forschungslandschaft einnehmen und ein unausgeschöpftes Entwicklungspotential in diesem Forschungsbereich signalisieren. Gleichzeitig lässt sich aus der Grafik schließen, dass die Entwicklung von softwarebasierten Lösungsansätzen bereits in ein anwendungsorientiertes Problemumfeld integriert ist. Teilbereiche können ohne eine begleitende Werkzeugentwicklung nicht bearbeitet werden, da

geeignete Ansätze nicht marktverfügbar sind.

9.5.2 Typologie softwarebasierter Lösungsansätze

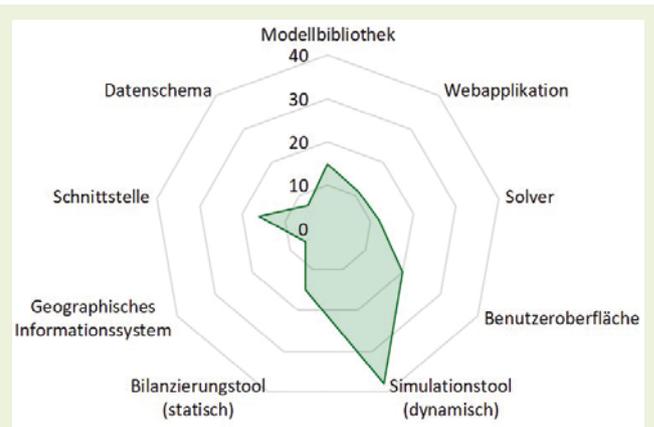


Abb. 9.5-2: Klassifizierung von softwarebasierten Lösungsansätzen

Wie in Abb. 9.5-2 zu sehen ist, kristallisiert sich bei näherer Typisierung der software-basierten Lösungsansätze ein eindeutiger Schwerpunkt der derzeitigen Entwicklung heraus. Die Entwicklung von dynamischen Simulationsverfahren hebt sich mit einem Anteil von 45 % sichtbar von allen Entwicklungen ab und verdeutlicht, dass die Komplexität der Probleme im Bereich der Energiewende durch eine statische Betrachtungsweise in vielen Fällen nicht mehr hinreichend genug gelöst werden kann. Gleichzeitig unterstreicht dies die Forderung nach Standards für die modell- und datenseitige Kopplung von Werkzeugen, um einen hohen Integrations- und Weiterverwendungsgrad sicherzustellen und Doppelförderungen zu vermeiden.

Anhand der folgenden zwei Beispiele soll demonstriert werden, dass die Implementierung dynamischer Simulationsverfahren in den einzelnen softwarebasierten Lösungen sehr unterschiedliche Ausprägungen annehmen kann. In einem Verbundvorhaben (O3ET1372A), an dem sich das Fraunhofer Institut für Integrierte Schaltungen beteiligt, wurde beispielsweise ein Ansatz zur Modellierung des Verhaltens von Gebäuden und Energiesystemen mit Hilfe von Grey-Box-Modellen gewählt, mit dem übergeordneten Projektziel, präzise Vorhersagemodelle zur kurzfristigen oder langfristigen Prognose des zukünftigen Energieverbrauchs im Gebäude zu entwickeln. In einem weiteren Verbundvorhaben unter Mitwirkung des Fraunhofer Instituts für offene Kommunikationssysteme (O3ET1312A) wird an softwarebasierten und dynamischen Planungs- und Steuerungstechniken zur optimalen Abstimmung von Systemkomponenten im Betrieb für eine nachhaltige und wirtschaftliche Nutzung von dezentralen Energiesystemen geforscht. An Beispiel der beiden Forschungsprojekte lässt sich zusammenfassend festhalten, dass sich die konkreten Entwicklungen hinsichtlich der betrachteten Lebenszyklusphasen und modellierten Ebenen des Gesamtsystems unterscheiden. Letzteres spielt in Hinblick auf die Genauigkeit eine hervorgehobene Rolle, denn durch das Zusammenführen verschiedener Ebenen wird das Gesamtsystem genauer beschrieben, wodurch eine realitätsgetreue Vorhersage von Prozessen und Modellen möglich wird. Im weiteren Verlauf werden die Ebenen Netz, Quartier, Gebäude etc. als Skalen bezeichnet und näher betrachtet.

9.5.3 Tendenz zur Multi-Skalen Modellierung

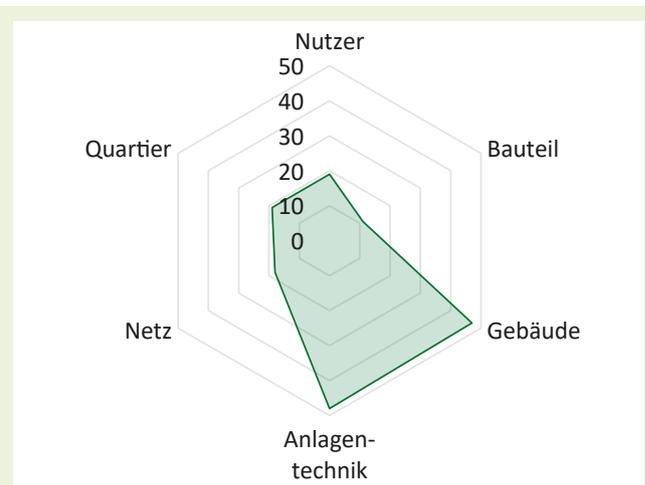


Abb. 9.5-3: Spektrum der Modellierung

Abb. 9.5-3 veranschaulicht die relevanten Skalen und Ebenen bei der Modellierung von softwarebasierten Lösungsansätzen und schlüsselt diese nach Häufigkeit der Ausprägung auf. Besonders stark ausgeprägt ist die Entwicklung von softwarebasierten Lösungsansätzen für das Gebäude (44 %) und die Anlagentechnik (43 %), wohingegen die Entwicklung von softwarebasierten Lösungsansätzen für Bauteilkomponenten, Netze oder Quartiere weniger im Fokus stehen. Aus der Abbildung geht jedoch nicht hervor, ob die Skalen isoliert oder kombiniert modelliert werden. Vor dem Hintergrund der Themen des neuen Energieforschungsprogramms der Bundesregierung [8] mit dem thematischen Fokus auf Reallabore ist ein neuer Trend hin zu Netz- und Quartiersansätzen zu erwarten.

Abbildung 9.5-4 greift den zuletzt genannten Aspekt auf und schlüsselt die Anzahl der kombinierten

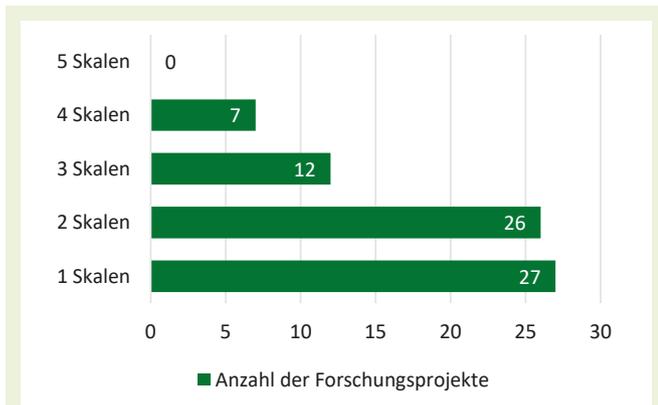


Abb. 9.5-4: Skalen der Modellierung

Skalen in einem softwarebasierten Lösungsansatz nach der absoluten Häufigkeit auf. Die gekoppelte Betrachtung von mehreren Skalen nimmt mit 62 % einen hohen Anteil an allen Entwicklungen ein und deutet darauf hin, dass tendenziell die Modellierung multipler Skalen stark an Bedeutung gewinnt. Dabei hat insbesondere die gekoppelte Betrachtung von zwei Skalen, wie zum Beispiel eines Gebäudes in Verbindung mit der Anlagentechnik, mit 36 % einen hohen Anteil, wohingegen softwarebasierte Lösungsansätze für die holistische Modellierung des Gesamtsystems noch komplett fehlen.

Letzteres hängt möglicherweise mit dem Fehlen fundierter methodischer Ansätze zur systemischen Bewertung oder mit der fehlenden Vorgabe, modell- und datenseitige Kopplung von Methoden und Werkzeugen einzufordern, zusammen. In einem Verbundvorhaben an dem sich das Zentrum für innovative Energiesysteme (O3ET1464A) beteiligt wird zum Beispiel eine Software zur gekoppelten Simulation von Gebäuden und Anlagen zur Kühlung, basierend auf flüssigen Übertragungsmedien, wei-

terentwickelt und um luftgestützte Systeme, größere Leistungsklassen und solare Kühlung mit Photovoltaik-Modulen in Kombination mit elektrischen Kältemaschinen ergänzt.

In einem weiteren Verbundvorhaben „Living Roadmap“ wird unter der Mitwirkung der RWTH Aachen ein ganzheitliches planungs- und betriebsunterstütztes Instrument entwickelt, das insgesamt vier Skalen abdeckt und durchgängig von der Konzeptentwicklung, dem Betrieb, der Nutzereinbindung bis hin zur Potentialermittlung für Investitionen genutzt werden kann. Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass der Trend bei der Modellierung weg von der Betrachtung isolierter Teilsystemen, hin zu multi-skalen Abbildung des dynamisch-technischen Verhaltens eines Gesamtsystems (Nutzer – Bauteil – Gebäude – Anlagentechnik – Netz – Quartier) geht.

9.5.4 Programmiertechnische Umsetzung

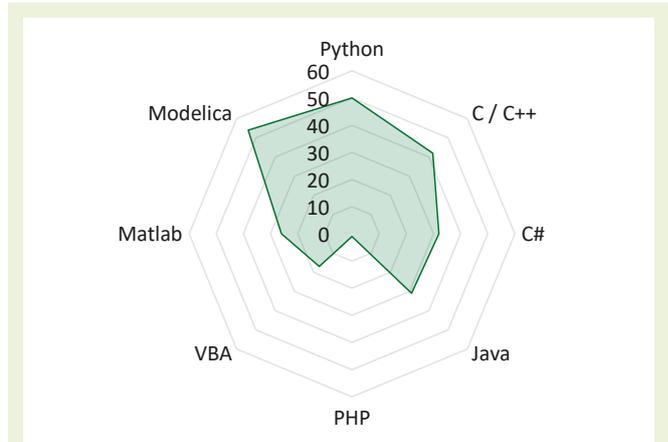


Abb. 9.5-5: Verwendete Programmiersprachen in der Entwicklung

Abbildung 9.5-5 veranschaulicht die zur Formulierung von Datenstrukturen und Algorithmen verwendeten Programmiersprachen. Am häufigsten wurde die objektorientierte Modellierungssprache Modelica für physikalische Systeme verwendet. Diese eignet sich etwa für die Modellierung von komplexen Simulationsmodellen und damit für den hier diskutierten Schwerpunkt der Entwicklung. Darüber hinaus werden objektorientierte Programmiersprachen C/C++ und Python verstärkt angewendet. Skriptsprachen wie PHP, JAVA oder PERL finden keine oder nur sehr geringe Verwendung.

9.5.5 Lizenzierung und Zielgruppen

Ingenieurbüros sind mit 32 % die am häufigsten angepeilte Zielgruppe von Entwicklern. Neben den Ingenieurbüros bilden Wissenschaft und Forschung selbst (29 %), Architekten (13 %), Energieversorger (12 %), Stadtplaner und Wohnungsbaugesellschaften (jeweils 7 %) mögliche Zielgruppen. Von allen 130 Forschungsprojekten, in denen softwarebasierte Lösungsansätze entwickelt werden, haben insgesamt nur 40 % Angaben zu Nutzungsrechten gemacht. Dies ist insofern interessant, als bei den Befragten einerseits eine klare Vorstellung der Zielgruppen besteht, andererseits offensichtlich ein Mangel an Vorstellung, wie diese erreicht werden sollen. Dies kann mit der experimentellen Natur von Forschungsprojekten zusammenhängen und der Ungewissheit der technologischen Anschlussfähigkeit, auf geringes Kommerzialisierungsbestreben der Entwickler oder geringe Skalierbarkeit der Entwicklungen hinweisen. Dieser Aspekt ist noch nicht

ausreichend geklärt und sollte im Rahmen fortführender Arbeiten adressiert und gezielt untersucht werden.

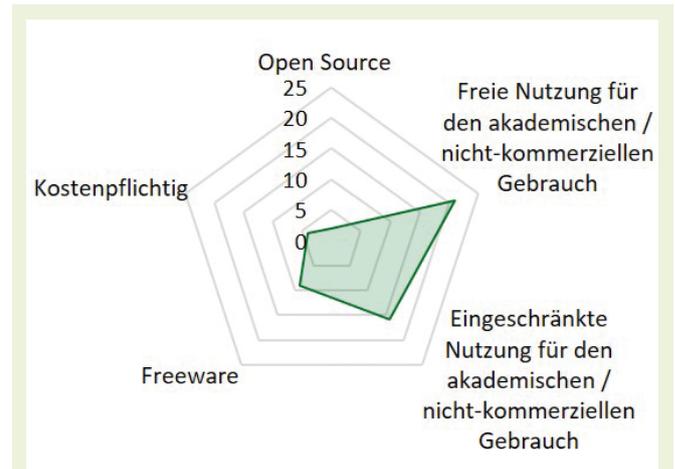


Abb. 9.5-6: Angestrebte Lizenzierung der Entwicklung

Abb. 9.5-6 veranschaulicht in diesem Zusammenhang die Häufigkeit verschiedener Lizenzmodelle bei softwarebasierten Lösungsansätzen. Ein großer Anteil von Forschungsprojekten strebt demnach eine freie Nutzung für den akademischen und nicht kommerziellen Gebrauch an (40 %). Eine Veröffentlichung des Quelltextes unter einer Open Source Lizenz wird jedoch nur von den wenigsten Institutionen in Erwägung gezogen (3 %). Dies stellt beispielsweise einen fundamentalen Unterschied zur Forschung im US-amerikanischen Markt dar, bei dem oftmals die Bereitstellung von wissenschaftlicher Software als Open Source Lösung praktiziert und damit eine hohe internationale Sichtbarkeit erreicht wird. Ein prognostizierter Paradigmenwech-

sel von der Einzeltoolentwicklung hin zu integrativen Ansätzen (evtl. auch als Open Source), der im Rahmen des EnOB Symposiums 2014 formuliert wurde (van Treeck et al., 2014), konnte bisher nur in Einzelfällen beobachtet werden.

9.5.6 Auswertung: Zielgruppen und Anwendung

Neben der Entwicklung wird die Anwendung von digitalen Werkzeugen häufig als ein zentraler Gegenstand der Forschungsprojekte gesehen. Rund die Hälfte aller Befragten gaben an, dass die Anwendung von digitalen Werkzeugen eine hervorgehobene Rolle im Forschungsprojekt spielt. Anwendungen finden dabei querschnittsübergreifend und parallel statt. Im Schnitt werden zwischen 4 bis 5 digitale Werkzeuge in einem Forschungsprojekt parallel eingesetzt. Dies zeigt zum einen, dass zur Bearbeitung der komplexen Aufgabenstellungen bisher kein Softwarehersteller eine Komplettlösung anbietet. Zum anderen folgt daraus, dass Interoperabilität bei der Lösung von Mehrskalen- und Mehrebenenproblemen in unterschiedlichen Domänen, im Sinne von einer datenseitigen und modellseitigen Kopplung von digitalen Werkzeugen, eine besondere Bedeutung zukommt [6]. In diesem Zusammenhang zeigt Tabelle 9.5-1, dass ungefähr 70 % der eingesetzten Anwendungen proprietär und kostenpflichtig sind. Lediglich 30 % entfallen auf Freeware (11,2 %) und auf Open Source Lösungen (19,2 %). Diesbezüglich spielen Anbieter proprietärer Software ihre Vorteile hinsichtlich Benutzerfreundlichkeit aus, die sich häufig aus einer zeiteffizienten Bedienung, Transparenz hinsichtlich der Validierung sowie Aufbereitung

der Ergebnisse und technischem Support ergeben. Dadurch stoßen proprietäre Softwareanbieter eines digitalen Werkzeugs auf höhere Akzeptanz und damit einhergehend breitere Anwendung. Dabei ordneten sich ca. 80 % der Anwender der Wissenschaft und Forschung zu. Es folgen Ingenieurbüros (10 %), Betreiber (4 %), Architekten (2 %), Energieversorger (2 %) und Wohnungsbaugesellschaften (1 %).

Tabelle 9.5-1: Verteilung der genutzten Lizenzierungsmodelle

Lizenzierungsmodell	Prozentualer Anteil [%]
Proprietäre Software	69,6
Freeware	11,2
Open Source	19,2

Schlussfolgernd lässt sich zunächst anmerken, dass die Ergebnisse zur Anwendungen digitaler Werkzeuge stark die Gewohnheiten aus Sicht der Wissenschaft und Forschung reflektieren. Damit ist der untersuchte Querschnitt zwar nicht repräsentativ für Anwender aus der Praxis, er bildet jedoch eine spezielle Gruppe von frühzeitigen Anwendern ab, die die neusten technischen Errungenschaften für die Problemstellungen im Bereich Energie in Gebäuden und Quartieren einsetzen. Die Anwendung von digitalen Werkzeugen wird dort von proprietären und kommerziellen Anbietern mit 1,81 digitalen Werkzeugen pro Forschungsprojekt dominiert, wobei Freeware (1,31) und Open Source (1,48) Lösungen zum festen Repertoire dazugehören. Zu einer Anwendung von digitalen Werkzeugen kommt es beispielsweise in einem Verbundvorha-

ben, an dem sich die Technische Universität Chemnitz (03ET1230B) beteiligt und neuartige oberirdische Tankspeicher in Segmentbauweise entwickelt. Dabei kommt es zum kombinierten Einsatz von verschiedenen numerischen Simulationswerkzeugen, wie zum Beispiel CFX, MATLAB, TRNSYS, Delphin und OpenFOAM. In einem weiteren Forschungsprojekt unter der Mitwirkung der Hochschule Zittau/Görlitz (03ET1363A) werden modulare Latente-Wärme-Speicherelemente für Kaminöfen wärmetechnisch mit Hilfe von OpenFOAM ausgelegt und konventionell mit Excel ausgewertet. Beide Beispiele verdeutlichen hochtechnologische Anwendungsfälle. Für eine detaillierte Analyse der Anwendungen

wurde auf der Grundlage einer Bestandsaufnahme von digitalen Werkzeugen eine Netzwerkanalyse durchgeführt, deren Ergebnisse im Verlauf näher betrachtet werden.

9.5.7 Digitales Ökosystem der Anwendung

Auf der Grundlage der Datenerhebung kann eine Bestandsaufnahme der in Forschungsprojekten konkret eingesetzten digitalen Werkzeuge gemacht werden. Aus diesen Angaben können Beziehungen, übergeordnete nutzerspezifische Muster und Toolketten sichtbar gemacht werden. Das digitale Ökosystem der Anwendungen ist in Abb. 9.5-7 exemplarisch dargestellt.

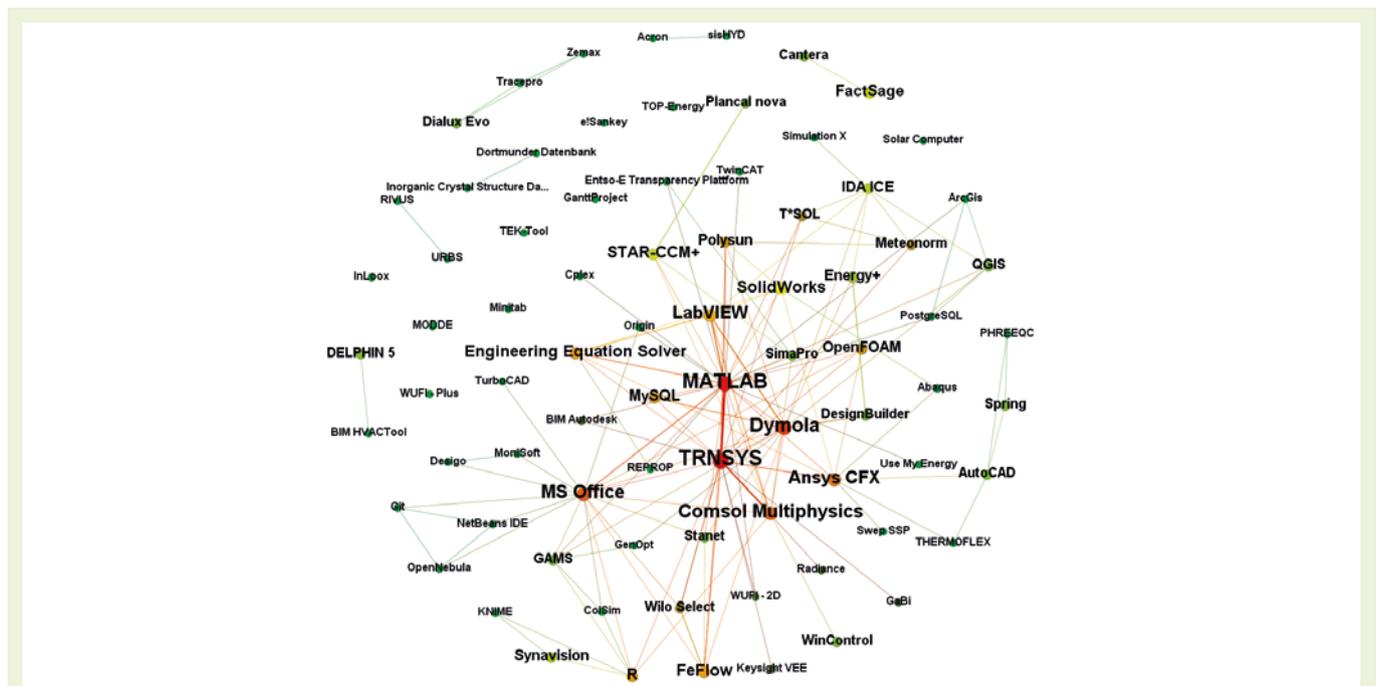


Abb. 9.5-7: Netzwerkanalyse des Tools-Ökosystems der EWB-Forschungsprojekte

risch anhand eines Graphen abgebildet. Die Knoten repräsentieren ein digitales Werkzeug, wobei die Größe und die Farbe mit der absoluten Häufigkeit der Nennungen einhergehen. Eine Kante entsteht aus der gemeinsamen Nennung von digitalen Werkzeugen. In diesem Fall bildet der Graph nicht die Möglichkeit ab, dass Werkzeuge über gemeinsame Schnittstellen gekoppelt werden können. Die Knoten werden so angeordnet, dass Knoten höheren Grades (d. h. mit mehr ausgehenden Kanten und somit mit mehr nutzerspezifischen Verbindungen) näher ins Zentrum der Darstellung rücken. Je häufiger ein digitales Werkzeug in Kombination mit anderen verwendet wird, desto zentraler ist die Position dieses Werkzeugs im Netzwerkdiagramm. Werkzeuge und Software mit einer breiten und häufig kombinierten Anwendung finden sich im Zentrum wieder, wohingegen Insellösungen und Nischenanwendungen den Rand der Darstellung prägen.

Auf der Grundlage der erhobenen Daten wurden die Entwicklungsstandorte der in Forschungsvorhaben eingesetzten digitalen Werkzeuge ausgewertet. Abb. 9.5-9 schlüsselt die Anzahl der digitalen Werkzeuge nach dem Entwicklungsstandort auf. Die Mehrzahl der Anwendungen lassen sich ihren Ursprungsländern USA (33), Deutschland (27) und Frankreich (4) zuordnen. Aus der Gegenüberstellung von Entwicklungsstandorten mit nutzerspezifischen Verbindungen lassen sich Schlüsse über nationale Unterschiede von digitalen Werkzeugen ziehen. Aus dem Verhältnis der kumulierten Verbindungsanzahl und der kumulierten absoluten Häufigkeit der digitalen Werkzeuge eines Standortes lässt sich ein gewichteter Vernetzungsgrad für jede Nation herleiten. Der Vernetzungsgrad gibt einen Aufschluss über die Rolle der digitalen Werkzeuge im Netzwerk und ist in Abbildung 9.5-8 dargestellt. Ein hoher Vernetzungsgrad trifft auf digitale Werkzeuge

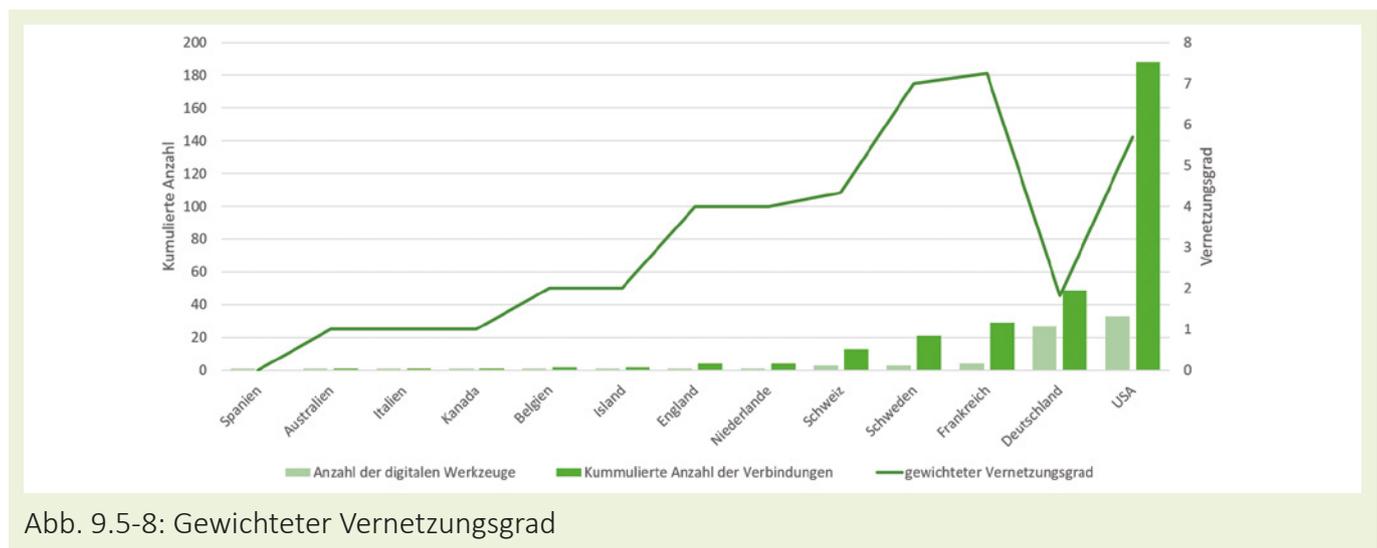


Abb. 9.5-8: Gewichteter Vernetzungsgrad

zu, die systemrelevant für das Ökosystem sind. Im Umkehrschluss deutet hingegen ein geringer Vernetzungsgrad auf leicht substituierbare und spezialisierte Insellösungen hin. Anwendungen aus den USA und Frankreich haben einen höheren Vernetzungsgrad und fungieren als Ökosystem für andere Anwendungen, wohingegen digitale Werkzeuge aus Deutschland einen geringen Vernetzungsgrad aufweisen und somit eher als spezialisierte Insellösungen charakterisiert werden können. Als Ursache kann unter anderem die in Deutschland bislang zu wenig verfolgte Strategie offener und frei zugänglicher Lösungen und die damit einhergehende fehlende internationale Sichtbarkeit identifiziert werden. Weitere Hemmnisse bestehen in fehlenden Schnittstellenvorgaben für die standardisierte digitale modell- und datenseitige Kopplung zwischen Planungswerkzeugen, Algorithmen und Methoden.

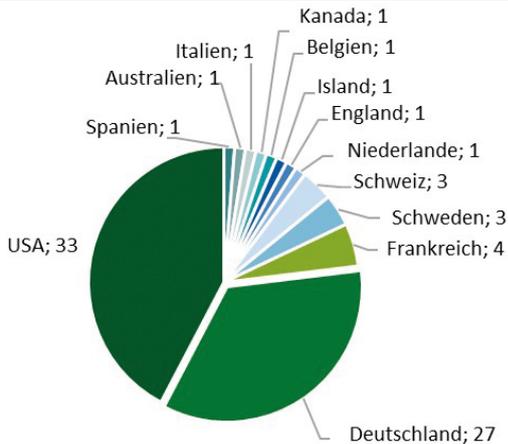


Abb. 9.5-9: Verteilung von Entwicklungsstandorten nach Toolanzahl

Die Entwicklung von softwarebasierten Lösungsansätzen und die Anwendung von digitalen Werkzeugen nimmt bei der Bearbeitung von komplexen Fragestellungen im Rahmen von Forschungsprojekten einen hohen Stellenwert ein. Die hohe Fragmentierung und Heterogenität dieser Entwicklungen führt oftmals zur Intransparenz und sorgt häufig für Kontroversen hinsichtlich der Rolle von Forschungsprojekten bei der Softwareentwicklung. Im Rahmen dieser Veröffentlichung wurde ein übergeordneter Einblick in die Entwicklungsaktivitäten und Anwendung gegeben. Neben einer eindeutigen terminologischen Abgrenzung wurde die querschnittsübergreifende Relevanz von Softwareentwicklung im Rahmen von Forschungsprojekten, eine Typologie von softwarebasierten Lösungsansätzen, eine Tendenz zur Multi-Skalen Modellierung, die programmiertechnische Umsetzung, Lizenzierungsmodelle und das digitale Ökosystem der Anwendung diskutiert. Anknüpfungspunkte für weiteren Forschungsbedarf bilden Fragestellungen bezüglich der Rolle der Entwicklung von Software, Planungswerkzeugen, Algorithmen und computerbasierten Methoden im Rahmen von Forschungsprojekten im gesamtwirtschaftlichen Kontext, Fördermodelle für einen besseren Forschungs- und Technologietransfer, wie integrale Entwicklungsansätze zur synergetischen Softwareentwicklung, Open Source Ansätzen und Vorgaben zur modell- und datenseitigen Kopplung, und damit auch dem Umgang mit Redundanzen. Der heute bereits praktizierte Kernaspekt der anwendungsorientierten Entwicklung zusammen

mit der gleichzeitigen Demonstration in der Praxis erscheint hierfür ein richtiger Ansatz. Diese Forderungen finden sich auch als Ergebnis der Expertenkonsultation im 7. Energieforschungsprogramm der Bundesregierung [8].

Im Bezug auf Reallabore als wichtiges Instrument des 7. Energieforschungsprogramms ist jedoch festzustellen, dass bislang, wie in Abschnitt 9.5.3 dargestellt, systemische Lösungsansätze für Mehrskalen- und Mehrebenenprobleme fehlen bzw. noch Einzellösungen darstellen. Vor dem Hintergrund von Reallaboren müssen Interaktionen mit dem übergeordneten Energiesystem, Verflechtungen innerhalb des urbanen Energiesystems und Wechselwirkungen mit dem nationalen Energiesystem dynamisch und für verschiedene Sektoren abgebildet werden können. Insofern ist eine Verlagerung der Entwicklungsschwerpunkte zu Netz- und Quartiersansätzen erforderlich.

- [1] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie: Bekanntmachung Forschungsförderung im 6. Energieforschungsprogramm, Forschung für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung: BAnz AT 30.12.2014 B1. 8.12.2014
- [2] BF-EWB: Forschung energieeffizienter Sanierungsmaßnahmen: Dokumentation des 1. Projektleitertreffens: Aachen, 24.-25. November 2016. Schriftenreihe Energiewendebauen, Wissenschaftliche Begleitforschung Energiewendebauen, RWTH Aachen University, 2016
- [3] BF-EWB: Integrales planen, bauen und betreiben: Dokumentation des 2. Projektleitertreffens Lüneburg, 22.-23. Mai 2017. Aachen: Wissenschaftliche Begleitforschung Energiewendebauen, RWTH Aachen University, Lehrstuhl für Gebäude- und Raumklimatechnik, 2017
- [4] Clarke J. A., Hensen J.L.M.: Integrated building performance simulation: Progress, prospects and requirements, Building and Environment, Volume 91, 2015, Pages 294-306
- [5] BF-EWB: „Wissenschaftliche Begleitforschung“, In: Energiewendebauen. Forschung für energieoptimierte Gebäude und Quartiere. Stand: 2018. <https://projektinfos.energiewendebauen.de/forschung/begleitforschung/> (Abruf am 15.10.2018)
- [6] van Treeck C., Antretter F., Heusler I., Maas A., Nicolai A., Plesser S., Tzscheutschler P., Voss K., Wagner A.: „EnOB-geförderte internationale Forschungsaktivitäten und Software-Tools; Red.schluss: 28. Februar 2014“. Energieinnovationen in Neubau und Sanierung: Neues aus der Forschung für mehr Energieeffizienz, Raumkomfort, Wirtschaftlichkeit und Nachhaltigkeit; 20.-21. März 2014; Essen, Zeche Zollverein, Kratz M.. Essen: EnOB, 2014

- [7] IEEE: IEEE standard glossary of software engineering terminology: Approved September 28, 1990, IEEE Standards Board. New York, NY, 1990
- [8] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (2018): 7. Energieforschungsprogramm. Innovationen für die Energiewende. der Bundesregierung. Hg. v. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi). Öffentlichkeitsarbeit. Berlin. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie

Kontakt:

RWTH Aachen
Lehrstuhl für Energieeffizientes Bauen

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Christoph van Treeck
treeck@e3d.rwth-aachen.de

Lev Kirnats, M.Sc.
kirnats@e3d.rwth-aachen.de

Jan-Niklas Joost, B.Sc.
joost@e3d.rwth-aachen.de

Sebastian Berg, M.Sc.
sebastian.berg@rwth-aachen.de

Dr.-Ing. Jérôme Frisch
frisch@e3d.rwth-aachen.de

9.7 Qualitätssicherung von Simulationsprogrammen für die energetisch optimale Planung und Sanierung von Gebäuden

9.7.1 Einleitung

In der aktuellen und vor allem zukünftigen Planungspraxis sind Simulationsprogramme unabdingbar. Etablierte vereinfachte Überschlagsrechnungen oder Tabellenverfahren führen derzeit bereits zu unwirtschaftlicher und klimaschädlicher Überdimensionierung. Ebenso kann eine übermäßige Vereinfachung von Berechnungsverfahren zu Einschränkungen bei Nutzungsanforderungen, z. B. Behaglichkeitskriterien, führen. Beispiele hierfür sind unter anderem die statische Auslegung von Heiz- und Kühlsystemen, obwohl eine dynamische Energiebereitstellung und Verteilung entsprechend der üblicherweise ebenso dynamischen Anforderungen zu kleineren und energieeffizienteren Systemen führen würde. In Bezug auf die Bewertung und den Nachweis des sommerlichen Wärmeschutzes haben die vereinfachten Wärmeeintragsverfahren bereits mehrfach zu unbehaglichen, überhöhten Raumlufttemperaturen geführt. Hier hat die Normung bereits reagiert und für alle nicht-trivialen Fälle die Simulationsanwendung vorgeschrieben. In anderen Anwendungsfällen berücksichtigen zwar die Normen und gesetzlichen Vorgaben derzeit die Simulation noch nicht im ausreichenden Maße, jedoch wenden Planer zunehmend moderne simulationsbasierte Verfahren komplementär zu traditionellen Normungsverfahren an. Simulation von Gebäuden und Energieversorgungssystemen ist und wird ein

wesentliches Werkzeug für den planenden Ingenieur/Architekten sein.

9.7.1.1 Begriffsklärung „Simulation“

Simulation im allgemeinen Sinne beschreibt die modellhafte Abbildung der Realität und Vorhersage entsprechender Verhaltensweise. In diesem allgemeinen Rahmen würden natürlich auch Monatsmittelwertverfahren bzw. sogar quasi-statische Bilanzverfahren passen. Für die Abbildung relevanter Prozesse in modernen Gebäuden ist eine zeitliche Auflösung von Stunden die obere Grenze, für viele Anlagenmodelle oder Regelungsmodelle ist sogar eine noch höhere zeitliche Auflösung notwendig. Grundsätzlich verstehen wir unter Gebäudeenergiesimulationsprogrammen also dynamische Modelle, welche mindestens eine Stundenauflösung verwenden. In solchen Simulationsprogrammen werden dann Bilanzgleichungen gelöst, welche u. a. die Energie in Zonen, Konstruktionen/Bauteilen und relevanten Versorgungssystemen und Speichern bilanziert. Hierbei werden üblicherweise thermische und elektrische Bilanzen verfolgt.

9.7.1.2 Simulationsqualität

Die Berechnungsalgorithmen in modernen Simulationsprogrammen sind komplex und aufgrund der Vielfältigkeit der Gebäude- und Anlagensysteme nicht nur eine lineare Abfolge von Gleichungen. Abhängig von Modellparametern, u. a. vielen verschiedenen Kombinationen von Bauteilen, Raumnutzungen, Verschattungs- und Lüftungskonzepten,

Energieversorgungsansätzen, Regelung etc., müssen sehr unterschiedliche Berechnungsverfahren und Gleichungen angewendet und gekoppelt gelöst werden. Diese in einer begleitenden Überschlagsrechnung zu prüfen ist i. d. R. für den Anwender nicht möglich. Ein direktes Nachrechnen der implementierten Algorithmen ist ebenso wenig zielführend, da aufgrund der Vielzahl verschiedener Methoden und Algorithmen eigentlich eine aufwändige vergleichende Programmierung notwendig wäre. Dies ist jedoch nicht sinnvoll oder machbar für Planer und Simulationsanwender. Der Nutzer von Simulationsprogrammen muss sich zwangsläufig auf die Berechnungsergebnisse verlassen können. Die Verwendung eines Simulationsprogrammes entbindet den Planer zwar nicht von der Pflicht der überschläglichen Prüfung, auch um eventuelle Eingabefehler zu erkennen, jedoch sollte die Software bei korrekten Eingaben auch physikalisch korrekte Ergebnisse liefern. Diese Anforderung kann mit dem Begriff Simulationsqualität beschrieben werden.

9.7.1.3 Überblick über die Methodik zur Qualitätssicherung

Wie kann also gewährleistet werden, dass ein Simulationsprogramm / Modell erwartungsgemäß funktioniert? Der Prozess der Qualitätssicherung und Dokumentation beginnt bereits im Softwareerstellungprozess (siehe Abschnitt „Qualitätssicherung im Softwarestellungsprozess“). Trotz aller Sorgfalt bei der Programmierung sind Fehler nie ganz ausgeschlossen. Validierungsverfahren (siehe Abschnitt „Vergleichende Funktionsprüfung und Zertifizie-

rung“) können helfen, hier die korrekte Funktion der Simulationssoftware nachzuweisen, wobei dies in der Regel nie vollumfänglich gelingen kann. Es ist hier ein Kompromiss zwischen Validierungsaufwand und ausreichender Funktionsprüfung zu finden.

Die Dokumentation der Softwarevalidierung ist in jedem Fall ein wichtiger Teil der Qualitätssicherung, da so der Anwender der Software einen Überblick über die geprüfte Funktionalität erhält, und Vertrauen in die Simulationsmodelle gewinnt. Um die Vorteile der Simulationsverfahren in der breiten Planungspraxis nutzen zu können, ist dieses Vertrauen unabdingbar.

9.7.2 Qualitätssicherung im Softwarestellungsprozess

Unabhängig davon, ob Software im universitären Umfeld oder in kommerziellen Softwarefirmen entsteht, ist es in jedem Fall sinnvoll, die nachfolgend beschriebenen Techniken zur Qualitätssicherung zu verwenden. Häufig stellt sich in der Praxis heraus, dass der anfängliche Aufwand zur Einarbeitung in die neue Technologie und Verfahrensweisen bereits nach kurzer Zeit durch Zeiteinsparung bei der Fehlersuche, Fehlerbehebung und letztlich durch bessere Software mehr als ausgeglichen wird.

9.7.2.1 Nachvollziehbarkeit von Änderungen durch Versionskontrollsysteme

Eine der wohl wichtigsten Technologien zur Unterstützung bei der Softwareentwicklung ist die Verwendung eines Versionskontrollsystems (engl. ver-

sion control software, VCS). Grundgedanke dabei ist, dass Änderungen am Quelltext zeitlich abgelegt werden. Dieses bietet unter anderem folgende Möglichkeiten:

- Falls ein Fehler im aktuellen Entwicklungsstand entdeckt wird, kann man den Quelltext auf bestimmte Zeitpunkte in der Vergangenheit zurücksetzen und dabei prüfen, wann und durch welche Änderung/Erweiterung ein Fehler entstanden ist.
- Man kann die Entwicklung eines Quelltextes nachvollziehen, d. h. welche Anpassung wann gemacht wurde (siehe Abb. 9.7-1). Der für jede Änderung angegebene Kommentar des Entwicklers kann hier Auskunft geben, über Motivation der Änderung bzw. konkrete Entscheidungen zu bestimmten Algorithmen und Datenstrukturen.
- Größere Umbauten des Quelltextes können zunächst getrennt von der allgemeinen Entwicklungsschiene in Angriff genommen werden, sodass während der Entwicklung der Erweiterung die Software selbst korrekt und geprüft weiter funktioniert.

Im Zusammenhang mit Team-Entwicklung, einer Selbstverständlichkeit in Softwarefirmen und zunehmend auch der Standard bei Forschungssoftware, gibt es noch eine Vielzahl weiterer Vorteile der Versionskontrollsysteme, z. B. zur Vermeidung versehentlichen Überschreibens einer Änderung eines Entwicklers durch einen anderen.

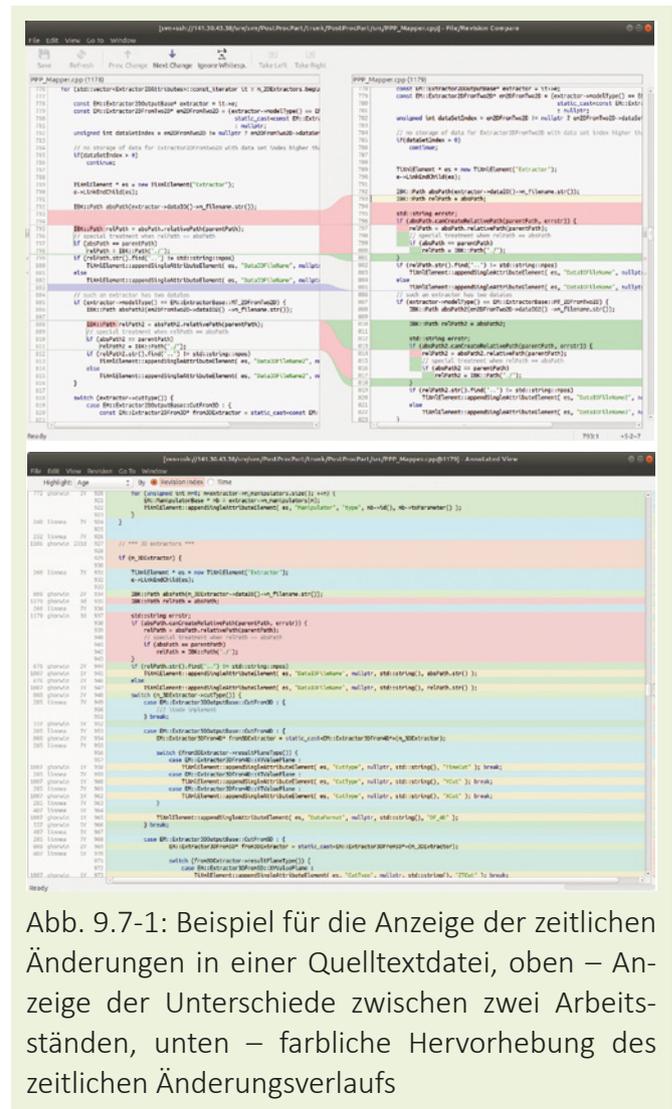


Abb. 9.7-1: Beispiel für die Anzeige der zeitlichen Änderungen in einer Quelltextdatei, oben – Anzeige der Unterschiede zwischen zwei Arbeitsständen, unten – farbliche Hervorhebung des zeitlichen Änderungsverlaufs

Grundvoraussetzung für den Einsatz eines Versionskontrollsystems ist die Verwendung einer Quelltext-basierten Programmiersprache mit Dateien im ASCII-Format. Dies sind derzeit nahezu alle gängigen Programmiersprachen, wie C/C++/Python/Ruby/Java etc.

Eine Ausnahme stellt VBA (Visual Basic for Applications) dar, welches häufig für die Automatisierung von Excel-Abläufen bzw. sogar für die Entwicklung von Berechnungstools verwendet wird. Obwohl die Programmiersprache selbst natürlich ASCII-Quelltexte verwendet, ist die Einbettung dieser in die binären Dateien (*.xls, bzw. .xlsm, welche komprimierte Verzeichnisstrukturen enthalten) problematisch. Sowohl die textbasierten Versionskontrollsysteme, wie auch viele andere nachfolgend beschriebene Qualitätssicherungsmechanismen können nicht mit VBA kombiniert werden. Wir raten daher explizit von der Entwicklung komplexerer Softwareprogramme in Excel/VBA ab und empfehlen stattdessen die Verwendung von Excel ausschließlich für die Datenerfassung und Auswertung. Die eigentliche Programmfunktionalität sollte in eine klassische Programmiersprache mit entsprechenden Excel-Unterstützungsbibliotheken ausgelagert werden.

Populäre Vertreter für Versionskontrollsysteme sind Subversion und Git, beide kostenfrei, wobei es noch viele weitere auch kommerzielle Versionskontrollsysteme gibt. Nach unserer Erfahrung sind die genannten VCS selbst für sehr große Softwareprojekte geeignet. Beide können über Kommandozeilenbefehle kontrolliert werden, allerdings ist es mitunter effizienter, auf entsprechend ausgestattete (zum Teil kommerzielle) Clientsoftware zurückzugreifen. Bei Verwendung eines VCS sollten alle individuellen Änderungen in einem definierten Hauptentwicklungszweig zusammengeführt werden. Dieser wird dann für die zentralen Review- und Testprozesse verwendet.

9.7.2.2 Review- und Testprozesse (Regression-Tests)

Während der Entwicklung einer Software besteht grundsätzlich immer die Möglichkeit, dass unabhängig bereits funktionierende Teile beeinträchtigt werden bzw. Fehler entstehen. Gerade bei komplexen Gebäudesimulationsprogrammen ist es sehr schwer, alle Abhängigkeiten stets berücksichtigen zu können. Fehler können durch einen zusätzlichen, automatisierten Änderungs-/Regressions-test (engl. regression test) schnell erkannt werden. Hierbei wird eine Reihe von Simulationsfällen ausgeführt und deren Ergebnisse mit vorab abgelegten Daten auf exakte Übereinstimmung geprüft. Bei deterministisch ablaufenden Programmen und unveränderten Parametern/Simulationseingangsparametern müssen die Ergebnisse erneut ausgeführter Rechnungen exakt mit denen vorheriger Rechnungen übereinstimmen. Daher sollten diese Tests auch grundsätzlich ohne nicht-deterministische Programmaspekte (Zufallsgeneratoren, Parallelisierung, etc.) durchgeführt werden. Ein Regressionstest sichert also ab, dass die Qualität der entwickelten Software von Änderung zu Änderung erhalten bleibt.

Es ist insbesondere hilfreich, wenn diese Tests automatisiert, z. B. täglich, ausgeführt werden. Eine Voraussetzung dafür ist, dass das Simulationsprogramm durch Aufruf aus einem Skript (Batch-Datei, bash-Skript, Python...) gestartet werden kann. Simulationsprogramme, deren Ausführung eine Nutzeraktion bedingt (bspw. Klick auf einen Button in der Oberfläche), können so nicht überprüft werden und

sind daher grundsätzlich schwieriger einer Qualitätskontrolle zu unterziehen. Wir empfehlen daher grundsätzlich die Trennung von Rechenkern (Kommandozeilenprogramm) und Programmoberfläche.

9.7.2.3 Automatisierte Regressionstests

Die Ausführung der Regressionstests kann automatisiert werden, indem ein Automatisierungswerkzeug wie z. B. Jenkins genutzt wird. Dieses erlaubt die Konfiguration zu automatisierender Prozesse

und die übersichtliche Darstellung der Ausführungsergebnisse (siehe Beispiel in Abb. 9.7-1). In einem solchen System sollte auch eine automatische Softwareerstellung (Compilierung) integriert werden, sodass jederzeit sichtbar wird, ob der aktuelle Hauptentwicklungszweig auf allen unterstützten Systemen korrekt erstellt werden kann.

Bei Fehlschlag einer Testreihe gibt das Fehlerprotokoll Aufschluss darüber, in welchem Programmteil genau ein Fehler aufgetreten ist. In Verbindung mit der Versionshistorie aus dem VCS lassen sich die

S	W	Name ↓	Letzter Erfolg	Letzter Fehlschlag	Letzte Dauer
●	⚙️	Benchmark	11 Stunden - #2557	Unbekannt	20 Minuten
●	⚙️	Daily-DataOLib	13 Stunden - #1383	Unbekannt	25 Sekunden
●	⚙️	Daily-Delphin5.6	20 Stunden - #2396	Unbekannt	3 Minuten 8 Sekunden
●	⚙️	Daily-Delphin5.8	6 Stunden 51 Minuten - #2409	Unbekannt	4 Minuten 47 Sekunden
●	⚙️	Daily-Delphin5.9	7 Stunden 2 Minuten - #1766	Unbekannt	5 Minuten 53 Sekunden
●	⚙️	Daily-Delphin6	19 Stunden - #1877	Unbekannt	17 Minuten
●	⚙️	Daily-Delphin6SolverTrunk	21 Stunden - #2574	Unbekannt	4 Minuten 24 Sekunden
●	⚙️	Daily-JBKLlib	7 Stunden 0 Minuten - #1386	Unbekannt	27 Sekunden
●	⚙️	Daily-JBKMLib	5 Stunden 28 Minuten - #1177	Unbekannt	1 Minute 33 Sekunden
●	⚙️	Daily-NandradSolverTrunk	7 Stunden 35 Minuten - #2203	Unbekannt	17 Minuten
●	⚙️	Daily-Test-Delphin6SolverTrunk	21 Stunden - #1866	1 Monat 27 Tage - #1812	1 Minute 50 Sekunden
●	⚙️	Daily-Test-Init-Delphin6SolverTrunk	21 Stunden - #1843	1 Jahr 8 Monate - #1227	1 Minute 20 Sekunden
●	⚙️	Daily-Test-NandradSolver	7 Stunden 17 Minuten - #1723	3 Tage 7 Stunden - #1720	9 Minuten 46 Sekunden
●	⚙️	Daily-Test-TheraklesSolver	20 Stunden - #1795	7 Tage 0 Stunden - #1788	1 Minute 34 Sekunden
●	⚙️	Daily-TheraklesApp	20 Stunden - #1887	Unbekannt	5 Minuten 28 Sekunden
●	⚙️	NR-IOS-CCMEditor-Trunk	2 Tage 1 Stunde - #1505	15 Stunden - #1507	1 Minute 22 Sekunden
●	⚙️	NR-IOS-Cond2-Trunk	7 Stunden 33 Minuten - #1502	Unbekannt	4 Minuten 47 Sekunden
●	⚙️	NR-IOS-Delphin6-Trunk	20 Stunden - #1571	Unbekannt	15 Minuten
●	⚙️	NR-IOS-iQLatorPro-Trunk	9 Stunden 45 Minuten - #1493	Unbekannt	4 Minuten 48 Sekunden
●	⚙️	NR-IOS-MasterSim-Trunk	6 Stunden 39 Minuten - #1257	Unbekannt	2 Minuten 37 Sekunden
●	⚙️	NR-IOS-PostProc-Trunk	14 Stunden - #1527	Unbekannt	9 Minuten 4 Sekunden
●	⚙️	NR-IOS-RemoteSolverClient-Trunk	15 Stunden - #1485	Unbekannt	1 Minute 18 Sekunden
●	⚙️	NR-IOS-Therakies-Trunk	3 Stunden 9 Minuten - #1525	Unbekannt	10 Minuten
●	⚙️	NR-IOS-TherakiesPro-Trunk	12 Stunden - #1257	Unbekannt	10 Minuten
●	⚙️	NR-Linux-CCMEditor-Trunk	20 Stunden - #1540	Unbekannt	52 Sekunden
●	⚙️	NR-Linux-Cond2-Trunk	14 Stunden - #1669	Unbekannt	3 Minuten 37 Sekunden

Abb. 9.7-2: Beispiel für die Übersichtsseite eines automatisierten Erstellungs- und Testsystems. Die Symbole in den ersten Spalten geben Auskunft über Erfolg und Fehlschlag und die Häufigkeit von Fehlern

seit dem letzten Testerfolg vorgenommenen Änderungen anzeigen, und so recht schnell Fehler eingrenzen und beheben.

9.7.3 Vergleichende Funktionsprüfung und Zertifizierung

Die Tests während der Entwicklung dienen primär der Prüfung, ob die Software so funktioniert, wie vom Modellierer und Programmierer vorgesehen. Jedoch ist dadurch noch nicht gesichert, dass das physikalische Modell korrekt formuliert und ausreichend detailliert ist, und das gewählte numerische Lösungsverfahren korrekte, bzw. ausreichend genaue Ergebnisse liefert. Dies kann durch eine vergleichende Prüfung, entweder mit analytischen Testverfahren (nur für sehr eingeschränkte Spezialfälle) oder durch Vergleich mit anderen Simulationsprogrammen erfolgen. Weiterhin ist es denkbar, einen Vergleich mit Messwerten zu erzielen.

Letztere Verfahrensweise wird häufig ebenfalls zur Validierung des Simulationsmodells verwendet, erfordert jedoch aufgrund der Vielzahl von Fehlerquellen (Messfehler, Messdateninterpretation, Modellgleichungen und Parametrisierung, Programmierung/Softwareumsetzung, Ergebnisdateninterpretation und Vergleich) sehr hohen Aufwand. Häufig werden nicht ausreichend Messwerte erfasst, um alle relevanten Modellparameter ausreichend einzugrenzen, sodass Freiwerte zum Anpassen des Modells bleiben. Bei grundlegend ausreichender Komplexität des Modells ist es so meist möglich, die Simulationsergebnisse an Messwerte anzupassen. Hierbei ist es häufig auch möglich, unbewusst

Programmierfehler durch Parameteranpassung zu kompensieren. Je komplexer ein Modell wird, umso mehr Parameter lassen sich nicht direkt messen und müssen geschätzt oder angepasst werden – mit entsprechendem minderndem Einfluss auf die Aussagefähigkeit der Validierung.

Daher ist die experimentelle Validierung eher als Nachweis zu verstehen, dass ein Modell grundlegend in der Lage ist, die experimentellen Ergebnisse zu reproduzieren. Für einen Qualitätsnachweis der Simulationssoftware selbst, ist die experimentelle Validierung nur mit sehr hohem Messaufwand geeignet. Empfehlenswert ist in jedem Fall, die Simulation zur Dimensionierung des Experiments und zur Auswahl der notwendigen Messstellen zu verwenden.

Demgegenüber hat ein Modell-Modell-Vergleich (d. h. Vergleich der Simulationsergebnisse verschiedener Programme) zwei Vorteile. Zum einen lassen sich Programme mit großen Ergebnisabweichungen recht einfach identifizieren und durch Überarbeitung der Modelle und/oder numerischen Algorithmen verbessern. Andererseits lässt sich so dokumentieren, dass eine Simulationsaufgabe von mehreren Programmen mit vergleichbarer Genauigkeit berechnet wird. Insbesondere für Planer und Ingenieure ist dies ein wichtiges Qualitätskriterium, da dadurch gewährleistet ist, dass toolunabhängig vergleichbare Planungsentscheidungen resultieren. Die Erarbeitung der individuellen Vergleichstests ist umfangreich und aufgrund der verschiedenen Anforderungsszenarien und Modelltiefen komplex. Im Forschungsprojekt SimQuality (FKZ 03ET1570) werden eine Methodik und eine Reihe von Simulations-

testfällen entwickelt, um Simulationsentwickler und Anwender bei der vergleichenden Simulationsprüfung zu unterstützen. Ein detaillierter Leitfaden zur Qualitätssicherung bei der Simulationssoftwareentwicklung ist ebenfalls in Arbeit.

Wir bedanken uns für die Unterstützung bei der Erarbeitung dieses Dokuments und bei der Forschung zu diesen Aufgabenthemen im Rahmen des oben genannten Forschungsprojektes SimQuality.

Kontakt:

TU Dresden
Institut für Bauklimatik

Dr. Andreas Nicolai
andreas.nicolai@tu-dresden.de

9.8 Softwarequalität in Energieprojekten

9.8.1 Einleitung

Aus Sicht des Software Engineering ergeben sich in der Forschung zu energieoptimierten Gebäuden und Quartieren eine Vielzahl an Fragestellungen. Im Gegensatz zu vorhergehenden Betrachtungen zu softwaretechnischen Herausforderungen für Infrastrukturen zur Ermöglichung und zum Betrieb energieeffizienter Städte [1] fokussieren wir uns im Folgenden auf die Qualität der entstehenden Softwareprodukte und Verbesserung ebendieser.

Zwischen der Entwicklung von Demonstratoren und real verwendeter Softwareprodukten bestehen in der Softwareentwicklung große Unterschiede, die sich insbesondere auf die Entwicklungszeit und damit die Kosten solcher Produkte auswirken. Betrachtet man beispielsweise die „Technology Readiness Level (TRL)“, so erreichen viele Projekte TRL 6 oder 7, also Demonstratoren in echter Umgebung oder Prototyp im Einsatz. Daher wird die Software in solchen Projekten oft auch nur für diese Prototyp-Ebene entwickelt. An Systeme in realen Umgebungen, die für mehrere Jahre benutzbar und weiterentwickelbar sein sollen, bestehen jedoch deutlich höhere Anforderungen hinsichtlich der Qualität auf unterschiedlichen Ebenen, z. B. der Zuverlässigkeit, Benutzerfreundlichkeit, Änderbarkeit, Performanz und Wiederverwendbarkeit.

Es stellt sich daher die Frage, welche Designprinzipien für die Entwicklung von qualitativ hochwertiger Software in Energieprojekten relevant und hilfreich sind.

Bei Software entstehen gegenüber herkömmlichen Produktionsprozessen keine Qualitätsmängel durch die Massenproduktion, die sich dann nur selektiv in einem oder einem anderen Produkt widerspiegeln. Bei Software sind Qualitätsmängel in der Entwicklung begründet und ziehen sich über die gesamte Software hinweg. Die Erfahrung hat gezeigt, dass die Qualität der Entwicklungsprozesse erheblichen Einfluss auf die Qualität der Software hat [2]. Neben einer guten Strukturierung der Prozesse (z. B. durch Vorgehensmodelle oder Qualitätsmanagement Standards wie CMMI, SPICE oder die ISO 9000 Familie) sind für Energieprojekte insbesondere Themengebiete, wie die gute Handhabbarkeit der Benutzeroberflächen, die Anpassbarkeit der Systeme, adäquate Softwarearchitekturen sowie die Möglichkeit, auf Änderungen reagieren zu können, relevant. Wir behandeln hier daher eine Reihe von Designprinzipien, deren Einhaltung zu einer besseren Qualität in Energieprojekten führen und zeigen dazu beispielhafte Anwendungen.

9.8.2 Adäquate Softwarearchitekturen

Zentrale Aufgabe in vielen Energieprojekten ist das Sammeln und Auswerten von Daten und darauf basierend das Beeinflussen der Umgebung. Klassischerweise werden dazu Sensoren, die Daten über ihre Umgebung sammeln, und Aktuatoren, die ihre Umwelt beeinflussen können, mit einem oder mehreren Servern verbunden. Aus Kostengründen werden diese Server mehr und mehr von Cloudlösungen verdrängt, bei denen Ressourcen auf Abruf bereitgestellt und damit dynamisch an den tatsäch-

lichen Bedarf angepasst werden können. Das bedingt mehrere Designprinzipien für die Entwicklung von Software Architekturen.

Um die Ressourcen der Cloud effizient zu nutzen, sollte die Software in kleine, voneinander unabhängige Komponenten, sogenannte Microservices [3], aufgeteilt werden. So können auch einzelne Teile der Anwendung auf Abruf benutzt werden, ohne dass nicht benötigte Teile der Anwendung Ressourcen verschwenden. Die Unabhängigkeit der Komponenten erlaubt es, bei hohem Datenaufkommen zu Stoßzeiten benötigte Komponenten durch die Cloud zu replizieren und damit eine Nichtverfügbarkeit des Systems wegen Überlastung zu verhindern. Dadurch, dass die Komponenten nur über klar definierte Schnittstellen Nachrichten miteinander austauschen, können sie leicht in anderen Kontexten wiederverwendet werden. Ein weiterer Vorteil ist, dass die einzelnen Services parallel von verschiedenen Teams entwickelt und getestet werden können, solange für jede Komponente und deren Schnittstellen eine klare Spezifikation existiert.

Um das Ziel einer Architektur mit unabhängigen, leicht austauschbaren, wiederverwendbaren Komponenten zu erreichen, sollten auch bei der Konzeption bzw. Komposition der Komponenten Best Practices beachtet werden. Robert C. Martin ordnet die Komponenten in seinem Leitfaden zur „Clean Architecture“ [4] dazu in konzentrischen Kreisen an, wobei Abhängigkeiten zwischen Komponenten immer nur von einem äußeren Kreis auf einen inneren Kreis verweisen dürfen, aber niemals umgekehrt. Dadurch ist sichergestellt, dass die Anwendungslogik, die sich in den inneren Kreisen befindet, nicht

von externen Faktoren wie Frameworks oder GUIs abhängt, die sich in den äußeren Kreisen befinden.

9.8.3 Agilität im Entwicklungsprozess

Die Energiebranche obliegt, wie auch viele andere Anwendungsgebiete, von innerhalb eines Projektes, z. B. Kunden oder Stakeholdern getriebenen Änderungen der Anforderungen an Softwaresysteme, aber auch von extern getriebenen, z. B. durch Änderungen von Gesetzen oder politischen Gegebenheiten. Die Entwicklungsprozesse müssen daher agil auf solche Änderungsbegehren reagieren können. Neben agilen Vorgehensmustern wie Scrum oder Kanban müssen auch die technischen Prozesse und Werkzeuge auf kontinuierliche Änderungen reagieren können und diese unterstützen. Insbesondere Modell-getriebene Ansätze haben sich hier in den letzten Jahren bspw. für die Oberflächengestaltung oder die Testautomatisierung als praktikabel erwiesen [5].

9.8.3.1 Anpassbarkeit und Benutzerfreundlichkeit der Oberflächen

Die Gestaltung von gut bedienbaren und attraktiven graphischen Benutzeroberflächen (GUIs) ist insbesondere für menschenzentrierte Anwendungen relevant, in denen z. B. Bewohner oder Betreiber sowohl Informationen dargestellt bekommen als auch Interaktionen mit einem System durchführen müssen. Eine Möglichkeit, um rasch vorzeigbare Prototypen zu gestalten und diese GUIs anpassbar zu gestalten, ist die Verwendung von Code Genera-

toren, die aus Modellen GUIs (und mehr) generieren können [6]. Abb. 9.8-1 zeigt die Grundprinzipien dieses Prozesses: Aus Modellen, die verwendete Daten sowie darzustellende Oberflächen beschreiben, wird durch Verwendung von Templates für unterschiedliche Zielsprachen eine Datenbank, die Kommunikationsinfrastruktur sowie Backend und Frontend eines Client-Server Systems erstellt. In den GUI-Modellen können verschiedene Darstellungen für unterschiedliche Benutzergruppen definiert werden, die dann entsprechend im Frontend angezeigt werden (siehe Abb. 9.8-1 rechts). Kombiniert man diese Ansätze noch mit Prinzipien von Assistenzsystemen [7], so kann man zudem Benutzerführungen durch die Systeme sowie Unterstützungsfunktionen für die Nutzung der zur Verfügung gestellten Programmfunktionen einfach realisieren. Modell-getriebene Ansätze ermöglichen es, (1) rasch Demonstratoren für Benutzer zur Verfügung zu stellen, die dann weiterentwickelt werden können

und nicht weggeworfen werden müssen und (2) schnell auf Änderungswünsche der Benutzer in den Oberflächen reagieren zu können.

Grundsätzlich ist es möglich, solche Code-Generierungsansätze auch auf andere Systemarchitekturen oder Programmiersprachen zu übertragen, in denen stark repetitive Code-Teile vorhanden sind oder die Generierungsmechanismen für andere Anwendungszwecke wie z. B. die Analyse oder das Testen von Codes einzusetzen.

9.8.3.2 Test und Automatisierung

Komplexe Systeme und fehleranfällige Programmiersprachen sind auch in der Energieforschung weit verbreitet. Zudem bergen agile Entwicklungsprozesse das Risiko, dass die Qualität der entwickelten Software darunter leidet. Aus diesen Gründen ist das systematische Testen von Softwaresystemen ein wichtiger Bestandteil des Entwicklungsprozesses

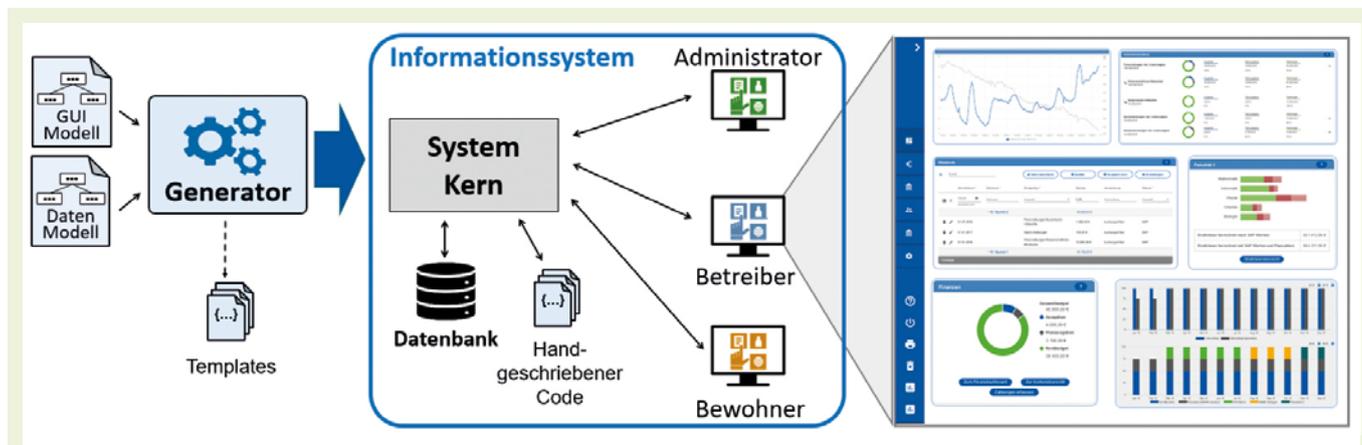


Abb. 9.8-1: Grundprinzip der Generierung von Oberflächen für ein Informationssystem

ses [8]. In typischen Projekten umfasst die Testzeit 40–50 % der Gesamtentwicklungszeit [9], da viele Ebenen getestet werden müssen: es gibt Komponenten-, Integrations- und Systemtests bis hin zu Stress- und Abnahmetests.

Durch ein strukturiertes, methodisches Vorgehen, einer guten Testplanung und einem hohen Automatisierungsgrad sind hier sowohl höhere Testabdeckungen wie auch zeitliche Einsparungen möglich [8]. Eingesetzte Methoden sind hier beispielsweise toolunterstützte gegenseitige Code Reviews, das strukturierte Ableiten von Testdaten durch Äquivalenzklassenbildung oder die Nutzung von Methoden zur Anweisungs-, Zweig- und Pfad-Überdeckung. Agile Entwicklungsmethoden verfolgen oft einen Test-first-Ansatz, bei dem nach der fachlichen Analyse direkt Tests erstellt werden und erst danach die konkrete Implementierung erfolgt. Des Weiteren wird das Modell-basierte Testen verwendet, bei dem Testfälle teilweise oder komplett aus Modellen abgeleitet werden [10], [11],[8].

9.8.4 Wiederverwendung und Konfigurabilität

Die Wiederverwendung von bestehenden Systemen oder Komponenten im Entwurfsprozess hat die Informatik mit vielen anderen technischen Disziplinen gemein. Dort betrifft die Wiederverwendung dann eher Hardware oder reale Bauteile vom Kleinen bis ins Große. Auch wiederverwendete Softwareeinheiten können von ganzen Anwendungssystemen über Komponenten bis hin zu einzelnen Objekten oder Funktionen reichen.

Die Wiederverwendung von Objekten oder Funktionen ist bereits gängige Praxis, wie z. B. durch die Verwendung von Standardbibliotheken. Für die Wiederverwendung von einzelnen Softwarekomponenten (von Subsystemen bis einzelnen Objekten) ist es notwendig, diese unabhängig vom Gesamtsystem zu entwickeln, über Schnittstellen konfigurierbar zu machen, Standardschnittstellen zu benutzen. Man benötigt eine Middleware, die die Kommunikation zwischen den Komponenten steuert und man muss die Entwicklungsprozesse für die komponentenbasierte Entwicklung anpassen. Die Wiederverwendung von Komponenten kann durch Entwurfsentscheidungen erschwert werden. Zu einem guten Programmierstil gehört daher auch die Verwendung von Entwurfsmustern [12].

Die Wiederverwendung von Anwendungssystemen kann durch Konfiguration z. B. durch Verwendung domänenspezifischer Sprachen (DSLs) [13] oder die Entwicklung von Produktlinien für verschiedene Kunden angepasst werden oder man kommt durch die Zusammenfassung mehrerer Systeme zu einer neuen Anwendung. Zu letzterem wurde bereits in [14] angemerkt, dass die Kopplung von Werkzeugen über wohldefinierte Schnittstellen hierfür eine sinnvolle und anzustrebende Maßnahme für bestehende Lösungen wäre. Betrachten wir nun zwei Varianten zur besseren Konfigurierung von Systemen etwas genauer.

9.8.4.1 Variabilität und Konfigurabilität durch Produktlinien

Der Einsatz von Software in realen Umgebungen macht es oft notwendig, unterschiedliche Varianten eines Produkts auf z. B. derselben Hardware, Sensoren, Aktuatoren für unterschiedliche Arten von Gebäuden in unterschiedlichen Versionen auszuliefern bzw. diese auch für unterschiedliche Varianten der Hardware variabel veränderbar zu gestalten. Hierdurch wird es einerseits notwendig, Informationen darüber zu haben, welche Produktstände bei welchen Kunden in Betrieb sind, um insbesondere bei Updates oder Bugfixes die entsprechenden Systeme bzw. Altsysteme (legacy) zu identifizieren und aktualisieren und andererseits die Entwicklungsprozesse von Anfang an dahingehend zu optimieren, Softwarekomponenten leicht wiederverwendbar bzw. anpassbar zu gestalten.

Im Software Engineering wurde für das Variantenmanagement das Konzept der Produktlinien eingeführt, dass man bereits gut im produzierenden Gewerbe wie der Automobilbranche kennt. Softwareproduktlinien (SPL) sind eine Sammlung an Anwendungen, die eine gemeinsame Problemereichspezifische Architektur besitzen [2]. Ein gemeinsamer Anwendungskern wird jedes Mal weiterverwendet, einige Komponenten zur Bereitstellung- oder zur Entwurfszeit konfiguriert, zusätzliche implementiert oder an neue Anforderungen angepasst.

Für die SPL Entwicklung [15] sind jedoch zwei parallele Stränge von Entwicklungsprozessen notwendig (das abstrahierte Domänen-Engineering für die

allgemeinen, wiederverwendbaren Teile und das Applikations-Engineering für eine konkrete Anwendung), man benötigt einen guten Überblick über die realisierten Varianten, z. B. durch die Nutzung von Feature Diagrammen und muss insbesondere für die ersten beiden realisierten Systeme mit höheren Entwicklungszeiten rechnen, bis man dann langsam den Break-Even erreicht. Softwareproduktlinien machen es dann jedoch möglich, eine Vielzahl von Varianten bei besser planbaren Kosten in einer kürzeren Entwicklungszeit realisieren zu können.

9.8.4.2 Konfigurabilität durch DSLs

Eine andere Möglichkeit, Komponenten und Systeme gut wiederverwenden zu können, ist die Konfigurierung durch domänenspezifische Sprachen (DSLs). Mit Hilfe eigens definierter DSLs kann beispielsweise die strukturierte Planung von Performance-Zielen von Gebäuden bis hin zum konkreten Regelungsverhalten zur Laufzeit unterstützt werden [16]. zeigt hier bspw. einen Ansatz zur Optimierung der Energieeffizienz von Gebäuden und technischen Anlagen, in dem Regeln dazu verwendet werden, das funktionale Verhalten von Komponenten zu beschreiben und mit deren tatsächlichem Verhalten während des Betriebs abzugleichen. Beispiele für die Nutzung von DSLs zur Entwicklungszeit sind z. B. Architekturmodelle, um mögliche Variationspunkte von Komponenten zu beschreiben oder Delta-Modelle, um die Unterschiede zwischen Varianten abzubilden [5].

9.8.5 Zusammenfassung

Die Forschung zu energieoptimierten Gebäuden und Quartieren besteht in vielen Fällen aus einem Zusammenspiel von Software und Hardware. Durch den Einsatz von Methoden des Software Engineering wie beispielsweise adäquate Softwarearchitekturen, die generative Entwicklung von Benutzeroberflächen sowie die Testautomatisierung und wiederverwendbare Gestaltung von Objekten, Komponenten und Anwendungssystemen kann die Softwarequalität nachhaltig verbessert werden und schafft die Basis für langlebige, wartbare und wiederverwendbare Systeme.

Literatur:

- [1] Greifenberg, T., Look, M., Pinkernell, C., Rumpe, B.: Energieeffiziente Städte—Herausforderungen und Lösungen aus Sicht des Software Engineerings. In: Linnhoff-Popien C., Zaddach M., Grahl A. (Hrsg.), Marktplätze im Umbruch: Digitale Strategien für Services im Mobil Internet, Springer Berlin Heidelberg, 2015.
- [2] Sommerville, I., Software Engineering, 10. Aufl., Pearson Studium, 2018.
- [3] Newman, S., Building Microservices, 1. Aufl., O'Reilly, 2015.
- [4] Martin, R. C., Clean Architecture, 1. Aufl., Prentice Hall, 2017.
- [5] Hölldobler, K., Michael, J., Ringert, J. O., Rumpe, B., Wortmann, A., Innovations in Model-based Software and Systems Engineering, The Journal of Object Technology, 18, 2019, 1-60.
- [6] Adam, K., Michael, J., Netz, L., Rumpe, B., Varga, S., Enterprise Information Systems in Academia and Practice: Lessons learned from a MBSE Project. In: Digital Ecosystems of the Future: Methods, Techniques and Applications (EMISA'19), LNI, 2019.
- [7] Michael, J., Steinberger, C. Shekhovtsov, V. A., Al Machot, F., Ranasinghe, S., Morak, G., The HBMS Story - Past and Future of an Active Assistance Approach, Enterprise Modelling and Information Systems Architectures- International Journal of Conceptual Modeling, 13, 2018, 345-370.
- [8] Vigerschow, U., Testen von Software und Embedded Systems, 2. Aufl., dpunkt.verlag, 2010.
- [9] Myers G.J., Sandler C., Badgett T., The Art of Software Testing, 3. Aufl., Wiley, 2011.
- [10] Rumpe B., Agile Modeling with UML: Code Generation, Testing, Refactoring, Springer International, 2017.
- [11] Drave, I., Greifenberg, T., Hillemacher, S. Kriebel, S., Markthaler, M. Rumpe, B., Wortmann, A., Model-Based Testing of Software-Based System Functions., in: Conf. on Software Engineering and Advanced Applications (SEAA'18), Prague, 2018.
- [12] Gamma, E., Helm, R., Johnson, R., Vlissides, J., Design Patterns. Elements of Reusable Object-Oriented Software, Prentice Hall, 1994.
- [13] Clark, T., v. d. Brand, M., Combemale, B., Rumpe, B., Conceptual Model of the Globalization for Domain-Specific Languages. In: Globalizing Domain-Specific Languages (Dagstuhl Seminar), LNCS 9400, Springer, 2015, 7-20.
- [14] Kirnats, L., Joost, J.-N., Berg, S., Frisch, J., van Treeck, C., Status Quo bei digitalen Werkzeugen und softwarebasierten Lösungsansätzen. Bauphysik, 40, 2018, 441-

448.

- [15] Pohl K., Metzger A., Software Product Lines, in: Gruhn V., Striemer R. (eds) The Essence of Software Engineering. Springer, Cham, 2018.
- [16] Kurpick, T., Look, M., Pinkernell, C., Rumpe B., Modeling Cyber-Physical Systems: Model-Driven Specification of Energy Efficient Buildings, in: Proc. of the Modelling of the Physical World Workshop MOTPW ,12, ACM Digital Library, 2012.

Kontakt:

RWTH Aachen
Software Engineering

Jörg Christian Kirchhof, M.Sc.
kirchhof@se-rwth.de

Dr. Judith Michael
michael@se-rwth.de

Prof. Dr. Bernhard Rumpe
rumpe@se-rwth.de

9.9 Demonstration integraler Prozessketten im Anwendungsfall der Quartierssimulation: Langfristige Prognosen der quartiersbezogenen Wärmelast auf Basis optimierter Sanierungsfahrpläne

Bei dem nachfolgenden Beitrag handelt es sich um eine zusammengefasste Version des Beitrags „Long-term urban heating load predictions based on optimized retrofit orders : A cross-scenario analysis“ erschienen in *Energy and buildings*, Volume 208, 1 February 2020.

Ein Schlüsselement einer nachhaltigen Energieversorgung auf Quartiersebene stellt die Fernwärme dar. Bei der Auslegung von Wärmeerzeugern sind dahingehend jedoch auch langfristige Entwicklungen im Zusammenhang mit dem städtischen Wärmebedarf, insbesondere vor dem Hintergrund von Gebäudesanierungen, entsprechend einzubeziehen. In diesem Artikel wird ein datenbasierter Ansatz zur Vorhersage langfristiger städtischer Wärmelasten mit nichtlinearen autoregressiven exogenen rekurrenten neuronalen Netzen (NARX RNN) unter Berücksichtigung eines wirtschaftlich optimierten Sanierungsfahrplans vorgestellt.

9.9.1 Einführung

Die derzeitige Forschung zur städtischen Wärmeversorgung konzentriert sich auf die vierte und fünfte Generation von Fernwärmesystemen, die sich mit einer wachsenden Anzahl energieeffizienter Gebäude befassen sowie auf die Integration der erneuerbaren Energieerzeugung in intelligente Energiesysteme [1], [2]. Fernwärmesysteme zielen diesbezüglich auf die Nutzung lokaler Wärmequellen zur Versorgung von Gebäuden mittels Netze ab [3]. Dabei gilt es bei einer nachhaltigen Planung von städtischen Energiesystemen, Schwankungen in Bezug auf den zukünftigen Wärmebelastungsbedarf entsprechend zu berücksichtigen. Langfristige Prognosen sind jedoch aufgrund von Unsicherheiten hinsichtlich des Klimawandels oder der Entwicklung der städtischen Gebäudestruktur sehr schwierig. Die Ableitung von Sanierungsreihenfolgen für Quartiere stellt in diesem Zusammenhang eine wichtige Aufgabe der städtebaulichen Planung dar. Hierbei müssen neben technischen Aspekten jedoch auch wirtschaftliche Restriktionen entsprechend einbezogen werden.

In Bezug auf die thermische Lastprognose wird in der Literatur grundsätzlich zwischen physikalischen Ansätzen und datenbasierten Ansätzen unterschieden. Da erstere möglichst umfassende Informationen hinsichtlich Bauphysik, technischer Gebäudeausstattung und Nutzerverhalten benötigen, welche insbesondere auf Quartiersebene meist nicht zur Verfügung stehen, rücken datenbasierte Ansätze vermehrt in den Fokus [4]. Diesbezüglich wurden stochastische Zeitreihenansätze wie ARIMA-Me-

thoden (Autoregressive Integrated Moving Average) und Regressionsmodelle untersucht [5], [6]. In jüngster Zeit gehören Künstliche Neuronale Netze (KNN) und Support Vector Machines (SVM) aufgrund ihrer Stärken im Zusammenhang mit der nichtlinearen Vorhersagemodellierung zu den bewährten Methoden. In Bezug auf die Zeitreihenmodellierung haben sich NARX RNN als vorteilhaft erwiesen [7], [8].

Ein Kombinationsmodell aus wirtschaftlich optimierten Sanierungsreihenfolgen und langfristigen Wärmelastprognosen auf Basis von NARX RNN wurden in diesem Zusammenhang in [9] vorgestellt. In diesem Beitrag wird dahingehend eine integrale Prozesskette aufgezeigt, wie zunächst ein auf Basis des Lebenszykluskostenansatz wirtschaftlich optimierter Sanierungsfahrplan unter Berücksichtigung von Budgetrestriktionen ermittelt wird. Zur Evaluierung der Ergebnisse wird dieser mit zwei Alternativen verglichen. Bei der ersten Alternative werden die Gebäude entsprechend nach ihrem Baualter und bei der zweiten Alternative nach ihrem relativ zu erwartenden relativen Energieeinsparpotential saniert. Aufbauend auf den ermittelten Sanierungs-

fahrplänen wird auf Basis der charakteristischen Verbrauchskennwerte, den gebäudebezogenen historischen Wärmeverbrauchszeitreihen sowie Klimadaten der Fernwärmebedarf unter Verwendung eines NARX RNN prognostiziert.

9.9.2 Datensatz zur Modelldemonstration

In dieser Studie werden die Sanierungskosten generell auf Grundlage veröffentlichter statistischer Kostenparameter ermittelt [10]. Diesbezüglich wurden die Sanierungskosten verschiedener Gebäudenutzungsklassen anhand der Durchschnittskostenparameter der Gebäudekostengruppen KG 300 und 400 nach DIN 276 quantifiziert und auf das Jahr 2019 indexiert [11]. Die Kostenkennwerte für die unterschiedlichen Gebäudenutzungen sind in Tabelle 9.9-1 aufgeführt.

Der Kalkulationszinssatz wurde auf Basis einer 30-jährigen Bundesanleihe der Bundesrepublik Deutschland mit 0,872 % festgelegt. Gemäß Schulte kann der Kalkulationszinssatz grundsätzlich als Grenzrendite, Kapitalkostensatz, Durchschnittsrendite, Branchenrendite, Reinvestitionsrendite oder

Tabelle 9.9-1: Kostenkennwerte für Sanierungen verschiedener Gebäudenutzungen

Gebäudenutzung	Sanierungskosten [EUR/m ²]
Bürogebäude	1.522
Sporthallen	923
Produktion, Handel und Gewerbe, Lager, Garagen, Rettungsdienste	1.948

Tabelle 9.9-2: Allgemeine Eingabeparameter zur Bestimmung der Sanierungsreihenfolgen

Parameter	Wert	Einheit
Betrachtungszeitraum	31	a
Kalkulationszins	0,872	% p.a.
Preis Fernwärme (2019)	0,0682	EUR/kWh
Preissteigerung Fernwärme	2,43	% p.a.
Preissteigerung Baukosten	2,22	% p.a.

als subjektive Mindestrendite interpretiert werden [12]. Für die Heizkosten wurde eine jährliche Preissteigerungsrate von 2,43 % p. a. und für die Baukosten eine jährliche Preissteigerungsrate von 2,22 % p.a. angenommen. Diese Werte basieren auf dem

durchschnittlichen jährlichen Preisanstieg in den letzten 15 Jahren [13]. In Tabelle 9.9-2 sind die allgemeinen Eingangsparameter aufgeführt. Für die datenbasierten Lastprognosen wurden Sensordaten des Forschungszentrums Jülich ausgewählt. Der

Tabelle 9.9-3: Mittelwert und Standardabweichung der gemessenen Wärmelastzeitreihen in Abhängigkeit von der Gebäudenutzung

Gebäudenutzung	Anzahl	μ [kW]	Standardabweichung [kW]
Büro	26	94	66
Büro & Labor	26	103	79
Büro & Werkstatt	7	45	41
Büro & Betriebsgebäude	2	12	11
Büro & Experimentierhalle	1	16	20
Büro & Lehre	1	33	29
Labor	15	301	546
Experimentierhalle	8	91	77
Lagerhalle	5	29	68
Werkstatt & Lager	1	85	54
Sozialgebäude	4	44	33
Betriebsgebäude	1	453	278
Betriebsgebäude & Experimentierhalle	1	6	5

Tabelle 9.9-4: Minimum, Maximum, Mittelwert und Standardabweichung der Merkmalszeitreihen

Gebäudenutzung	Außen-temperatur [°C]	Mittlere Wind-geschwindigkeit [m/s]	Schulferienzeit [-]	Arbeitszeit [-]	Relative Luftfeuchte[+]
Min	-7,5	0	0	0	30,9
μ	11,4	2,1	0,8	0,3	76,1
σ	7,2	1,3	0,5	0,4	15,6
Max	35,9	10,2	1	1	100

Datensatz umfasst historische Wärmelastprofile (in stündlicher Auflösung) von 98 Gebäuden mit Baujahren zwischen 1918 und 2015. Die zugehörigen Gebäudenutzungsklassen sowie Mittelwert und Standardabweichung der entsprechenden Zeitreihen sind in der Tabelle 9.9-3 aufgeführt. Um den NARX RNN zu trainieren, werden außerdem historische Klimadaten und Information zu durchschnittlichen Gebäudenutzungszeiten durch den Datensatz abgedeckt. Die ausgewählten Variablen sowie die statistischen Werte der entsprechenden Zeitreihen sind in Tabelle 9.9-4 aufgeführt.

Für die lokale Quantifizierung zukünftiger Klimaszenarien werden Testreferenzjahre (Test Reference Years (TRY)) des Deutschen Wetterdienstes (DWD) verwendet. In diesem Zusammenhang stehen repräsentative Wetterdaten für die aktuelle Zeit und für den Zeitraum von 2031 bis 2060 zur Verfügung. Jährliche zukünftige Wetterdaten für den Zeitraum bis 2031 basieren auf einer linearen Interpolation zwischen den aktuellen repräsentativen Wetterdaten und den prägnostizierten Wetterdaten für den Zeitraum von 2031 bis 2060. Abbildung 9.9-1 zeigt beispielhaft geordnete Außentemperaturdauerkur-

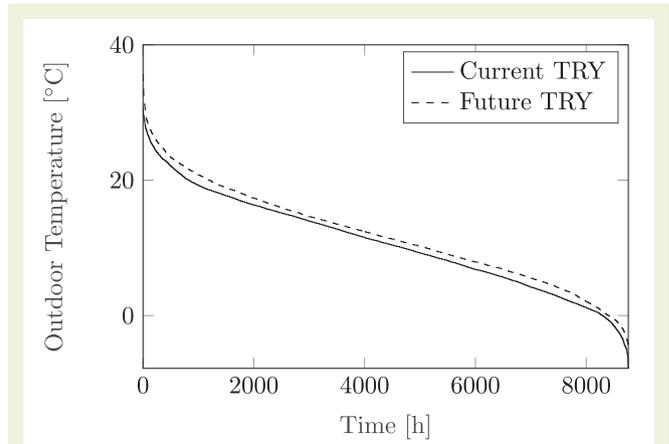


Abb. 9.9-1: Geordnete Jahresdauerlinien der Außentemperatur in Bezug auf den aktuellen und den zukünftigen TRY

ven der aktuellen und zukünftigen TRY. Zur Quantifizierung des zukünftigen Wärmeverbrauchs von sanierten Gebäuden werden jährliche Verbrauchskennwerte in Abhängigkeit von der Nutzfläche und der Gebäudenutzungskategorie gemäß der in Tabelle 9.9-5 aufgeführten deutschen Richtlinie VDI 3807-2 [14] herangezogen. Dabei wird der in der unteren Quartilsmitte als Richtwert genutzt,

Tabelle 9.9-5: Richtwerte für den Wärmeverbrauch nach der Sanierung in Abhängigkeit von der Gebäudenutzungs-kategorie nach VDI 3807

Gebäudenutzung	Verbrauchskennwert [kWh/(m²a)]
Büro	69
Werkstatt	59
Bibliothek	56
Lager	58
Betriebsgebäude	70
Institutsgebäude (Institut 2)	85
Institutsgebäude (Institut 3)	81
Institutsgebäude für Lehre und Forschung	63
Institutsgebäude für Forschung und Untersuchung	136
Kantine	138
Garagen	57
Experimentierhalle	136
Sozialgebäude	101

welcher als „anzustrebender Wert bei der Durchführung von Energieeinsparmaßnahmen“ in der Richtlinie definiert ist [15]. Da zahlreiche Gebäude durch Mischnutzungen gekennzeichnet sind, wurden für diese Gebäude Referenzwärmeverbrauchs-werte in Bezug auf den Anteil der einzelnen Gebäu-deteilnettoflächen berechnet. Das folgende Beispiel zeigt diesen Berechnungsschritt beispielhaft. (siehe Tabelle 9.9- 6).

Basierend auf diesen Parametern wird der Referenzwärmeverbrauchswert für das Beispielgebäude q_{Ex} wie folgt berechnet:

$$q_{Ex} = \frac{(2.334+2.291)*81+1.005*109+3.703*69}{9.333} \approx 79 \frac{kWh}{m^2a} \quad (1)$$

Das Energieeinsparpotential wird dabei nach dem Verhältnis zwischen dem witterungsabhängigen Verbrauchswert und dem entsprechenden witterungsabhängigen Referenzverbrauchswert abgeschätzt.

Tabelle 9.9-6: Eingabeparameter für die beispielhafte Berechnung des Referenzkennwertes von Gebäuden mit Mischnutzung

	Netto-Grundfläche [m²]	Verbrauchswert [kWh/(m²a)]	Referenzkennwert [kWh/(m²a)]
Büro	9.333	106	?
Werkstatt	2.334		81
Bibliothek	2.291		81
Lager	1.005		109
	3.703		69

9.9.3 Methoden

9.9.3.1 Datenvorverarbeitung

Häufig enthalten Datensätze Ausreißer, die die Datenanalysequalität erheblich beeinflussen. Es gibt verschiedene Methoden, um verschiedene Ausreißertypen zu erkennen und zu ersetzen [16], [17], [18]. In dieser Studie wird ein Verfahren des gleitenden Medians zur Erkennung von Ausreißern gemäß Gleichung (2) angewendet, wobei MAD den lokalen Median der absoluten Abweichungen bei gegebenem Datensatz X darstellt.

$$MAD = \text{median}(|X_i - \text{median}(X)|) \quad (2)$$

Die Größe des jeweiligen Analyseausschnitts ist auf fünf Zeitschritte festgelegt. Darüber hinaus wird jeder Datenpunkt über oder unter drei absoluten Abweichungen im lokalen Median als Ausreißer betrachtet. Diese Datenpunkte werden durch linear interpolierte Werte ersetzt, da Ausreißer die Datenanalysequalität stark beeinflussen. Um die Trainingsleistung zu verbessern und die Probleme in Bezug auf die Ausreißer zu reduzieren, wird der Input normalisiert. In diesem Zusammenhang konnte gezeigt werden, dass ein durchschnittlicher Input, der nicht nahe bei Null liegt, den Lernprozess verlangsamt [19]. Anschließend wurde jeder Eingangsvektor x mit Mittelwert und Standardabweichung gemäß Gleichung (3) normiert, wobei z den normierten Vektor darstellt.

$$z = \frac{x - \mu}{\sigma} \quad (3)$$

Die Eingabezeitreihen weisen daher einen Mittelwert von 0 und eine Standardabweichung von 1 auf.

9.9.3.2 Ökonomisch optimierte Sanierungsreihenfolgen

In dieser Studie wird die ökonomisch optimierte Sanierungsreihenfolge mithilfe der Kapitalwertmethode (NPV) ermittelt. Diesbezüglich wird der Barwert unter Berücksichtigung der Sanierungskosten SK und der Energiekosten EK eines Gebäudebestands N über einen Beobachtungszeitraum T minimiert (Gleichung (4)).

$$\min NPV = \sum_{n=1}^N \sum_{t=1}^T \left(\frac{SK_{n,t}}{(1+i)^t} + \frac{EK_{n,t}}{(1+i)^t} \right) \quad (4)$$

Da im Zusammenhang mit der Ermittlung von quartiersbezogenen Sanierungsreihenfolgen davon auszugehen ist, dass die meisten Institutionen und Liegenschaftsbetreiber aus finanziellen und organisatorischen Gründen nicht in der Lage sind, eine kurzfristige Sanierung aller Immobilien zu realisieren, wird als Restriktion ein maximal jährliches Investitionsbudget B eingeführt.

$$\sum_{n=1}^N SK_{n,t} \leq B_t, \forall t \in T \quad (5)$$

Zur Lösung des Optimierungsproblems wird Gurobi [20] als Solver genutzt.

9.9.3.3 Weitere Sanierungsszenarien

Die ökonomisch optimierte Sanierungsreihenfolge (Szenario C) wird mithilfe von zwei „konventionellen“ Sanierungsreihenfolgen in Bezug auf die verschiedenen Auswirkungen auch in Bezug auf die Vorhersage von Wärmelastprofilen evaluiert. Beim Szenario A wird eine Sanierungsreihenfolge auf Basis des Baujahrs ermittelt. Im Szenario B basiert die Sanierungsreihenfolge auf dem relativen Energieeinsparpotential.

- Szenario A – Baualter: Für jeden Iterationsschritt wird das älteste Gebäude ausgewählt. Ist das Investitionsbudget noch nicht überschritten, wird das Gebäude mit dem nächstjüngeren Gebäude ebenfalls in der Periode saniert.
- Szenario B – relatives Energieeinsparpotential: Für jeden Iterationsschritt wird das Gebäude mit dem höchsten Energieeinsparungspotenzial ausgewählt. Ist das Investitionsbudget noch nicht überschritten, wird das Gebäude mit dem nächsthöheren Energieeinsparungspotenzial ebenfalls in der Periode saniert.

9.9.3.4 Rekurrentes Neuronales Netzwerk in der NARX-Konfiguration

In dieser Studie basieren gebäudebezogene Wärmebedarfsprognosen auf NARX RNN mit einer verdeckten Schicht und 30 verdeckten Neuronen, die eine hohe Performanz in Bezug auf datenbasierte Wärmebelastungsvorhersagen auf Quartiersebene zeigten [7]. Da NARX RNN in der Lage sind, vergangene Zustände in Bezug auf Eingangs- und Ausgangsgrößen rekursiv zu berücksichtigen [21], sind Zeitverzögerungen in der Netzwerkkonfiguration integriert. Die Anzahl der für die Prognose aktueller Ausgabewerte berücksichtigter historischer Eingangsvektoren wurde durch Variation der Zeitverzögerung zwischen einer Stunde und sechs Stunden untersucht. Hinsichtlich der mittleren Fehlerquadrate wurden die besten Ergebnisse im Durchschnitt mit einer Zeitverzögerung von 1 Stunde erzielt. In Bezug auf die NARX-RNN-Architektur ist eine Sigmoidal-Aktivierungsfunktion integriert. In diesem Zusammenhang repräsentiert Gleichung (6) die Aktivierungsfunktion des Neurons j in Abhängigkeit von den Eingangswerten u_i bis u_M , dem Gewichtungsfaktor w und dem Verzerrungsparameter b .

$$\Phi_j(u_i) = \tanh\left(\sum_{i=1}^M w_{i,j}u_i + b_i\right) \quad (6)$$

Unter Berücksichtigung der Summe der Ausgabewerte stellt Gleichung (7) die entsprechende mathematische Formulierung dar, wobei W die Gewichte in Bezug auf die Verbindung zwischen versteckten Neuronen und Ausgabeneuronen darstellen, zuzüglich des Verzerrungsparameters B .

$$\Omega(\Phi_j) = \sum_{j=1}^N W_j \Phi_j + B \quad (7)$$

Zur Bewertung der Leistungsfähigkeit der Prognosemodelle wurde der Root Mean Squared Error (RMSE) gemäß Gleichung (8) gewählt, wobei $y_{predict,i}$ der prognostizierte Wärmeleistungswert i ist und $y_{data,i}$ den entsprechenden Zielwert darstellt.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_{predict,i} - y_{data,i})^2} \quad (8)$$

Für die Optimierung wird der Levenberg-Marquardt-Algorithmus angewendet [22], [23].

9.9.3.5 Wärmelastvorhersage

Zur Vorbereitung der Lastszenarioerzeugung werden gemessene Wärmeleistungsdaten in einen witterungsabhängigen Wärmeleistungswert \dot{Q}_{wd} und einen witterungsunabhängigen Wärmeleistungswert \dot{Q}_b unterteilt, wobei Q_t die Heizgrenztemperatur darstellt. Abbildung 9.9-2 zeigt den methodischen Ablauf. \dot{Q}_{wd} wird mittels einer linearen Regressionsanalyse bestimmt und \dot{Q}_b basiert auf iterativer Approximation. Anschließend kann \dot{Q}_b in Bezug auf die Stunden des betrachteten Zeitraums abgeleitet und berechnet werden.

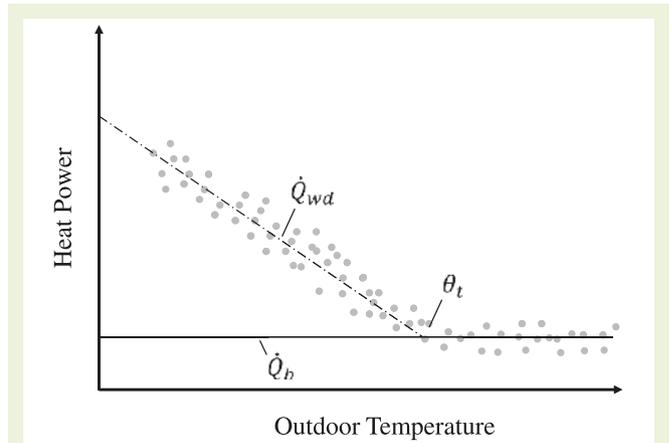


Abb. 9.9-2: Methodisches Verfahren zur Berechnung witterungsabhängiger und witterungsunabhängiger Wärmeleistungsanteile

In dieser Studie basiert die Langzeitwärmelastprognose für sanierte Gebäude auf den folgenden vereinfachten Annahmen:

- Die zukünftige witterungsunabhängige Wärmeleistung \dot{Q}_b ist von der Sanierung nicht betroffen und kann aus historischen Wärmeverbrauchsdaten abgeleitet und fortgeschrieben werden.
- Die zukünftige witterungsabhängige Wärmeleistung $\dot{Q}_{wd,ret}$ reduziert sich gegenüber der historischen witterungsabhängigen Wärmeleistung $\dot{Q}_{wd,hist}$ um $\Delta\dot{Q}$, da nach der Sanierung ein reduzierter gebäudespezifischer Wärmeleistungsbedarf zu erwarten ist.
- $\Delta\dot{Q}$ wird durch den Prozentsatz angenähert, der sich aus dem Verhältnis zwischen dem repräsentativen Jahresverbrauchswert $q_{wd,ret}$ nach VDI 3807-2 und dem historischen spezifischen Wärmeverbrauchswert $q_{wd,hist}$ ergibt.

Dieses Vorgehen ist auch in Abbildung 9.9-3 dargestellt. Unter Berücksichtigung der Annahmen wird ΔQ durch Gleichung (9) angenähert.

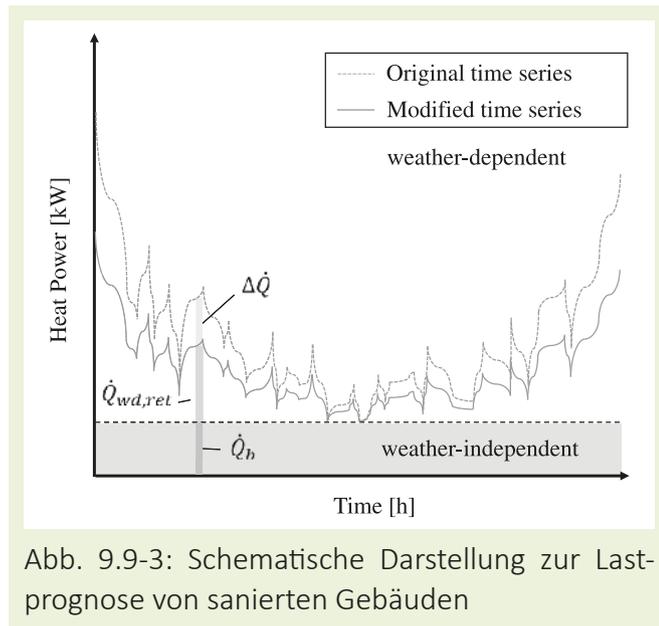


Abb. 9.9-3: Schematische Darstellung zur Lastprognose von sanierten Gebäuden

$$\Delta \dot{Q} = \left(1 - \frac{q_{wd,ret}}{q_{wd,hist}} \right) \sum \dot{Q}_{wd,hist} \quad (9)$$

Die prozentuale Abweichung p_i eines einzelnen Verbrauchswertes errechnet sich dabei aus dem Verhältnis der Abweichung zwischen dem historischen witterungsabhängigen Wärmeverbrauch $\dot{Q}_{hist,i}$ und der Summe der historischen Wärmeleistungswerte.

$$p_i = \frac{\dot{Q}_{wd,hist,i}}{\sum_{j=1}^n \dot{Q}_{wd,hist,j}} \quad (10)$$

Schließlich wird ein neuer Wärmebedarfswert eines nachgerüsteten Gebäudes $\dot{Q}_{wd,ret,i}$ mittels Gleichung (11) angenähert.

$$\dot{Q}_{wd,ret,i} = \dot{Q}_{wd,hist,i} - \Delta \dot{Q} \cdot p_i \quad (11)$$

In Bezug auf die Lastprognose wird folgende methodische Vorgehensweise abgeleitet:

- Das Netzwerktraining basiert auf historischen Daten und das trainierte Netz wird mittels TRY-Daten und der in Zukunft zu erwartenden Gebäudenutzungsprofile simuliert.
- Für jedes Gebäude wird geprüft, ob dieses auf Grundlage der optimierten Reihenfolge saniert werden soll und wenn dies zutrifft, wird der witterungsabhängige Wärmeleistungsanteil ab dem Folgejahr reduziert.

Zusätzlich wird in dieser Studie angenommen, dass kein gebäudespezifischer Wärmebedarf während des Sanierungsprozesses besteht.

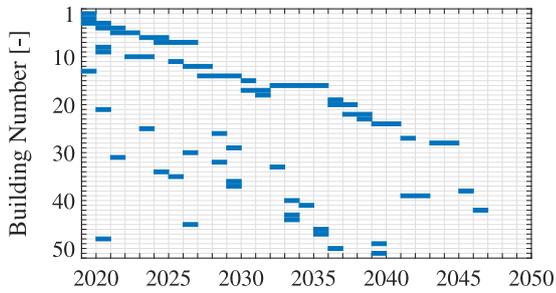


Abb. 9.9-4a: Szenario A–Retrofit order

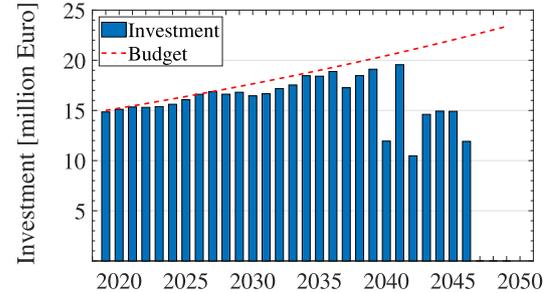


Abb. 9.9-4d: Szenario A–Investment and budget limit

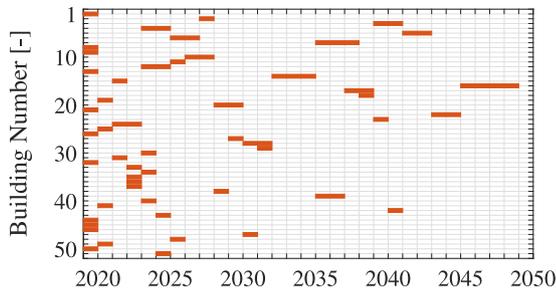


Abb. 9.9-4b: Szenario B–Retrofit order

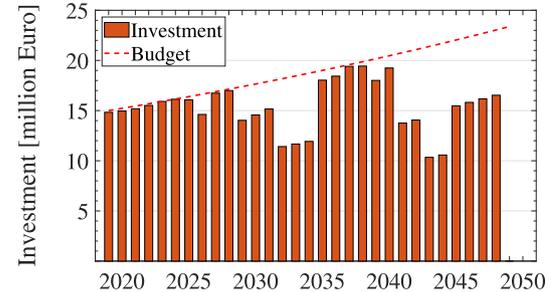


Abb. 9.9-4e: Szenario B–Investment and budget limit

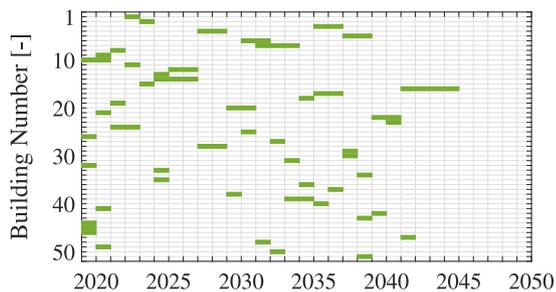


Abb. 9.9-4c: Szenario C–Retrofit order

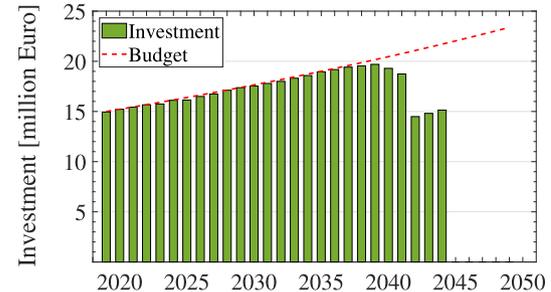


Abb. 9.9-4f: Szenario C–Investment and budget limit

9.9.4 Ergebnisse

In Abbildung 9.9-4 sind die Ergebnisse der szenario-bezogenen Sanierungsreihenfolgen dargestellt. Der linke Teil von Abbildung 9.9-4 zeigt die Sanierungsreihenfolgen für die Szenarien A bis C. Da die Gebäudenummern nach Baujahren sortiert sind, geht aus Abbildung 9.9-4a die Sanierungsreihenfolge nach Gebäudealter qualitativ hervor, während in den Szenarien B und C keine Muster zu erkennen sind. Das maximale jährliche Investitionsbudget für die Sanierung wurde zu Beginn des Betrachtungszeitraums mit 15 Millionen Euro angenommen und für die folgenden Perioden um 1,49 % p. a. gesteigert. Insbesondere im Hinblick auf die optimierte Sanierungsreihenfolge zeigt Abbildung 9.9-4f, dass das maximale Budget nahezu in allen Perioden ausgeschöpft wird. In Tabelle 9.9-7 sind die berechneten Barwerte der drei Szenarien aufgeführt.

Tabelle 9.9-7: Barwerte der drei betrachteten Szenarien

Szenario	Methode	Barwerte [EUR in Millionen]
Szenario A	Baualter	485,44
Szenario B	Rel. Energieeinsparpotential	484,82
Szenario C	Ökonomisch optimierte Reihenfolge	476,09

Die Ergebnisse zeigen, dass durch die ökonomisch optimierte Reihenfolge im Vergleich zu den Reihenfolgen nach Baualter oder relativen Energieeinsparpotential ca. 2 % der Kosten eingespart werden können. Es ist jedoch zu beachten, dass die ermittelten Barwerte mit hohen Unsicherheiten verbunden sind. Insbesondere Sanierungskosten sowie die Wärmeverbräuche nach der Sanierung sind kritisch zu hinterfragen. Darüber hinaus hat der Kalkulationszins einen wesentlichen Einfluss auf den berechneten Barwert. Eine Änderung des Kalkulationszinssatzes hätte zwar keinen Einfluss auf die Sanierungsreihenfolgen der Szenarien A und B, da sich die Budgetbeschränkung auf die nominalen Kosten bezieht. Die Sanierungsreihenfolge im Szenario C würde jedoch aufgrund der Auswirkungen des Kalkulationszinssatzes im Zusammenhang mit der dynamischen Investitionsberechnung erheblich variieren.

Abbildung 9.9-5 zeigt beispielhaft eine langfristige Wärmelastprognose vor dem Hintergrund eines sich ändernden Gebäudebestands. Darüber hinaus zeigen die Abbildungen 9.9-6 bis 9.9-9 den prognostizierten Wärmebedarf (Minimum, Mittelwert, Median, Maximum) für den Zeitraum von 2019 bis 2050 für die Szenarien A, B und C. Die Ergebnisse deuten auf eine potenzielle Verringerung der quartierspezifischen Spitzenlast von etwa 6 MW bis 2050 und eine zeitlich variierende Spitzenlast in Bezug auf die verschiedenen Szenarien hin (siehe Abbildung 9.9-9). Der prognostizierte Mittel- und Medianwert im Jahr 2050 ist im Vergleich zu 2019 um etwa 3 MW niedriger. Die Grundlast bleibt nahezu konstant, was auf die anfänglichen Modellannah-

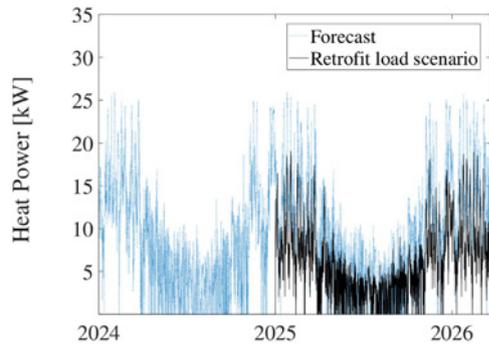


Abb. 9.9-5: Schematische Darstellung zur Lastprognose von sanierten Gebäuden

men zurückzuführen ist. Die jährlichen Schwankungen in Bezug auf die Wärmeleistung können hauptsächlich auf die Annahme eines nicht vorhandenen Energiebedarfs während des Sanierungsprozesses

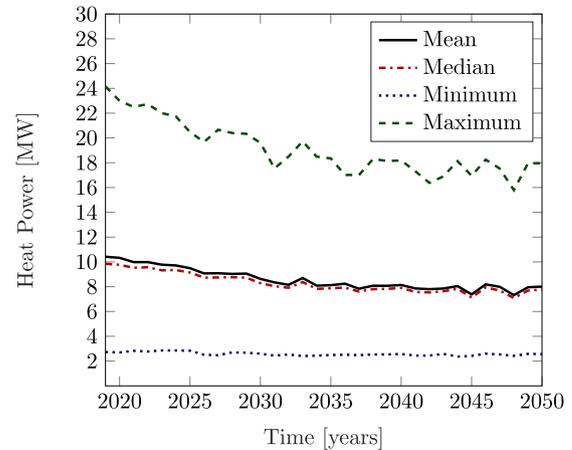


Abb. 9.9-7: Prognostizierter Wärmeleistungsbedarf (Minimum, Mittelwert, Median, Maximum) basierend auf Szenario B

zurückgeführt werden.

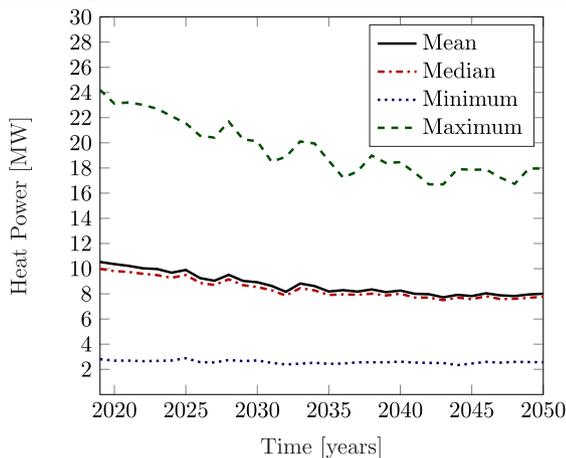


Abb. 9.9-6: Prognostizierter Wärmeleistungsbedarf (Minimum, Mittelwert, Median, Maximum) basierend auf Szenario A

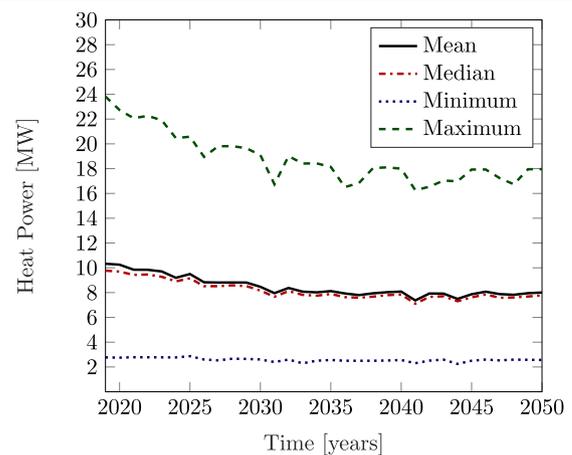


Abb. 9.9-8: Prognostizierter Wärmeleistungsbedarf (Minimum, Mittelwert, Median, Maximum) basierend auf Szenario C

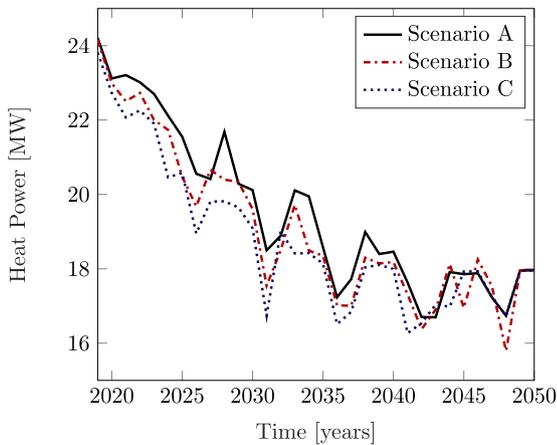


Abb. 9.9-9: Vergleich der prognostizierten maximalen Wärmeleistungsschwankungen auf Quartiersebene über die Zeit

Die Ergebnisse zeigen weiterhin, dass die Sanierung von Gebäuden in bestimmten Zeiträumen zu einer Lastverlagerung auf Quartiersebene führen, indem das Spitzenlastniveau gesenkt und das Grundlastniveau erhöht wird. Zusätzlich zeigt eine Szenarioanalyse für 2025 erhöhte Spitzen- und mittlere Wärmeleistungsanforderungen basierend auf der Sanierungsreihenfolge A im Vergleich zu B und C. Die entsprechenden Lastkurven sind in Abbildung 9.9-10 dargestellt. Unter Berücksichtigung der Wärmelastprognosen für das Jahr 2050, die in Abbildung 9.9-11 dargestellt sind, kann die Form der Jahresdauerlinien gemäß Szenario A, B und C durch eine Verringerung der Spitzen- und mittleren Wärmebelastung charakterisiert werden. Die Grundlast wird jedoch unwesentlich reduziert. Trotzdem wird dieses Ergebnis als angemessen angenommen, da

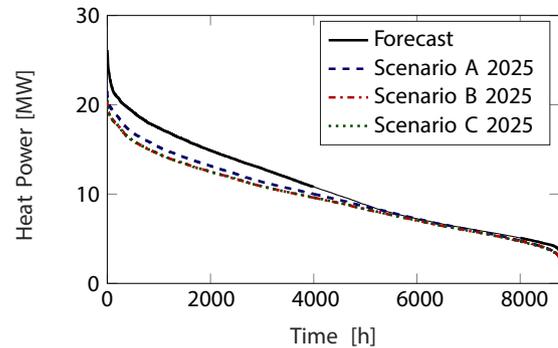


Abb. 9.9-10: Szenarioübergreifende Darstellung der prognostizierten Jahresdauerlinien für 2025

der Prozesswärmebedarf eines Quartiers aus Nichtwohngebäuden im Vergleich zum wetterabhängigen Wärmebedarf möglicherweise nicht stark gesenkt werden kann. Im Hinblick auf die Vorhersagegenauigkeit auf Quartiersebene im Rahmen des Modelltestverfahrens ergab sich ein Mittelwert der RMSE-Werte von 25, 33 und ein Median der RMSE-Werte von 4,71. Diese Ergebnisse sind mit denen anderer Studien vergleichbar [4]. Hierbei ist jedoch der individuelle Charakter des zugrunde liegenden Datensatzes zu berücksichtigen.

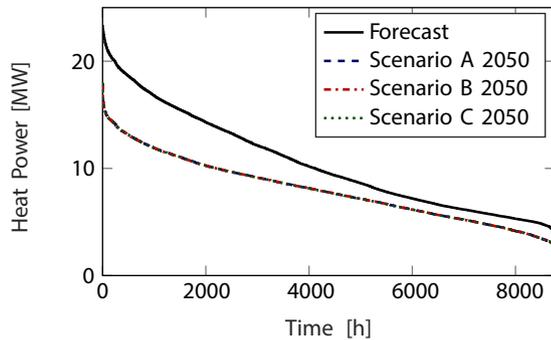


Abb. 9.9-11: Szenarioübergreifende Darstellung der prognostizierten Jahresdauerlinien für 2050

9.9.5 Fazit

Langfristige Wärmelastprognosen auf Quartiers-ebene scheitern häufig an mangelnden Informationen. Zudem müssen zukünftige Entwicklungen hinsichtlich des gebäudebezogenen Wärmebedarfs für eine nachhaltige Energieplanung berücksichtigt werden. Wesentliche Einflüsse sind dahingehend auf Sanierungsmaßnahmen zurückzuführen, die grundsätzlich den Energiebedarf eines Gebäudes senken. In dieser Studie wird ein datenbasiertes Langzeit-Wärmeverhersagemodell basierend auf NARX RNN vorgeschlagen. Zur Darstellung der Effekte von Sanierungsmaßnahmen wurde eine ökonomisch optimierte Sanierungsreihenfolge und zwei konventionelle Sanierungsreihenfolgen ermittelt. In Bezug auf die Modelldemonstration kann gezeigt werden, dass die Optimierung von Sanierungsreihenfolgen auf Quartiersebene nach dem Lebenszykluskostenansatz zu einem niedrigeren

Kapitalwert im Vergleich zu Sanierungsreihenfolgen auf der Grundlage des Baujahrs und des relativen Energieverbrauchs führt. Unter Berücksichtigung der Auswirkungen auf langfristige Vorhersagen der Wärmelast zeigen die Ergebnisse zeitabhängige Schwankungen des Wärmebedarfs nach verschiedenen Sanierungsreihenfolgen aufgrund des geringeren Wärmeverbrauchs und der Unterbrechung der Gebäudenutzung während der Sanierungsmaßnahmen. In diesem Zusammenhang kann es im Laufe der Zeit zu Lastverschiebungen auf Quartiers-ebene aufgrund einer verringerten Spitzenlast und einer erhöhten Grundlast kommen. Dieser Effekt ist bei der Planung des Energiesystems und bei den Betriebsstrategien zu berücksichtigen. Die Ergebnisse der Modelldemonstration sollten jedoch im Zusammenhang mit anfänglichen Modellannahmen ausgewertet und vor dem Hintergrund der gebäudespezifischen Informationsknappheit auf Quartiersebene betrachtet werden. Mit dem aufgezeigten Ansatz können zukünftige Entwicklungen des Wärmebedarfs approximiert und quantifiziert werden. Zukünftige Forschungsarbeiten sollten sich in diesem Zusammenhang auf die Auswertung statistischer Eingabeparameter sowie auf Unsicherheits-/Sensitivitätsanalysen, Modellannahmen und weitere Modellanwendungen konzentrieren.

Die Autoren danken dem deutschen Bundesministerium für Wirtschaft und Energie für die finanzielle Unterstützung des Projekts „EnEff:Stadt, EnEff:Campus: Living Roadmap: Entwicklung eines Energieversorgungskonzepts mit modellbasierter prädiktiver Regelung anhand einer Living Roadmap am Beispiel des Forschungszentrum Jülich“ (FKZ: 03ET1352A) im Rahmen des sechsten Energieforschungsprogrammes. Ein besonderer Dank gilt insbesondere den mitwirkenden Projektpartnern—namentlich dem Forschungszentrum Jülich und dem Lehrstuhl für Gebäude und Raumklimatechnik (E.ON ERC EBC) der RWTH Aachen University bei der Erhebung und Speicherung der verwendeten Daten.

Literatur:

- [1] Lund H., Østergaard P. A., Chang M., Werner S., Svendsen S., Sorknæs P., Thorsen J. E., Hvelplund F., Mortensen B. O. G., Mathiesen B. V., et al., The status of 4th generation district heating: Research and results, *Energy*.
- [2] Lake A., Rezaie B., Beyerlein S., Review of district heating and cooling systems for a sustainable future, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 67 (2017) 417–425.
- [3] Werner S., International review of district heating and cooling, *Energy* 137 (2017) 617–631. doi:10.1016/j.energy.2017.04.045.
- [4] Amasyali K., El-Gohary N. M., A review of data-driven building energy consumption prediction studies, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 81 (2018) 1192–1205. doi:10.1016/j.rser.2017.04.095.
- [5] Fan J. Y., McDonald J. D., A real-time implementation of short-term load forecasting for distribution power systems, *IEEE Transactions on Power Systems* 9 (2) (1994) 988–994. doi:10.1109/59.317646.
- [6] Dotzauer E., Simple model for prediction of loads in district-heating systems, *Applied Energy* 73 (3-4) (2002) 277–284. doi:10.1016/S0306-2619(02)00078-8.
- [7] Koschwitz D., Frisch J., van Treeck C., Data-driven heating and cooling load predictions for non-residential buildings based on support vector machine regression and NARX Recurrent Neural Network: A comparative study on district scale, *Energy* 165 (2018) 134–142. doi:10.1016/j.energy.2018.09.068.
- [8] Connor J., Atlas L. E., Martin D. R., Recurrent networks and NARMA modeling, in: *Advances in Neural Information Processing Systems*, 1992, pp. 301–308.
- [9] Koschwitz D., Spinnraker F., Frisch J., van Treeck C.,

- Long-term urban heating load predictions based on optimized retrofit orders: A cross-scenario analysis, *Energy & Buildings*, Volume 208 (2020).
- [10] Baukosteninformationszentrum, *Baukosten - Gebäude Altbau – Statistische Kostenkennwerte* (2015).
- [11] Statistisches Bundesamt. (Destatis), *Preisindizes für die Bauwirtschaft-Neuberechnung auf Basis 2015-* (2018).
- [12] Schulte K.-W., *Wirtschaftlichkeitsrechnung*, Springer-Verlag, 2013.
- [13] Statistisches Bundesamt. (Destatis), *Preise - Daten zur Energiepreisentwicklung - Lange Reihen von Januar 2005 bis November 2018* (2018).
- [14] Verein Deutscher Ingenieure, *Verbrauchskennwerte für Gebäude – Verbrauchskennwerte für Heizenergie, Strom und Wasser* (2014).
- [15] Verein Deutscher Ingenieure, *Verbrauchskennwerte für Gebäude – Grundlagen* (2013).
- [16] Hodge V., Austin J., *A Survey of Outlier Detection Methodologies*, *Artificial Intelligence Review* 22 (2) (2004) 85–126. doi:10.1023/B:AIRE.0000045502.10941.a9.
- [17] Han J., Kamber M., Pei J., *Data mining: Concepts and techniques*, third edition, The Morgan Kaufmann series in data management systems, Morgan Kaufmann Publishers, Waltham, Mass., 2012.
- [18] M. Gupta, J. Gao, C. C. Aggarwal, J. Han, *Outlier Detection for Temporal Data: A Survey*, *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering* 26 (9) (2014) 2250–2267. doi:10.1109/TKDE.2013.184.
- [19] Y. LeCun, L. Bottou, G. B. Orr, K.-R. Müller, *Efficient BackProp*, in: G. Goos, J. Hartmanis, J. van Leeuwen, G. B. Orr, K.-R. Müller (Eds.), *Neural Networks: Tricks of the Trade*, Vol. 1524 of *Lecture Notes in Computer Science*, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 1998, pp. 9–50. doi:10.1007/3-540-49430-8 2.
- [20] G. Optimization, Inc., *Gurobi optimizer reference manual*, 2015, URL: <http://www.gurobi.com>.
- [21] E. Diaconescu, *The use of NARX neural networks to predict chaotic time series*, *Wseas Transactions on computer research* 3 (3) (2008) 182–191.
- [22] D. W. Marquardt, *An Algorithm for Least-Squares Estimation of Nonlinear Parameters*, *Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics* 11 (2) (1963) 431–441. doi:10.1137/0111030.
- [23] M. T. Hagan, M. B. Menhaj, *Training feedforward networks with the Marquardt algorithm*, *IEEE transactions on neural networks* 5 (6) (1994) 989–993. doi:10.1109/72.329697.

Kontakt:

RWTH Aachen University
e3d Lehrstuhl für Energieeffizientes Bauen

Eric Spinnräker, M.Sc.
spinnraeker@e3d.rwth-aachen.de

Daniel Koschwitz, M.Sc.

Dr.-Ing Jérôme Frisch

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



10

VERÖFFENTLICHUNGEN DER
BEGLEITFORSCHUNG

Veröffentlichungen der Begleitforschung

2016

- Projektleitertreffen:** Wissenschaftliche Begleitforschung ENERGIEWENDEBAUEN (hrsg.) (2016). Dokumentation des 1. Projektleitertreffens in Aachen. Forschung energieeffizienter Sanierungsmaßnahmen. ISBN: 978-3-942789-86-8
- Forschung energieeffizienter Sanierungsmaßnahmen

2017

- Projektleitertreffen:** Wissenschaftliche Begleitforschung ENERGIEWENDEBAUEN (hrsg.) (2017). Dokumentation des 2. Projektleitertreffens in Lüneburg. Integrales Planen, Bauen und Betreiben. ISBN: 978-3-942789-85-1
- Integrales Planen, Bauen und Betreiben
- Projektleitertreffen:** Wissenschaftliche Begleitforschung ENERGIEWENDEBAUEN (hrsg.) (2017). Dokumentation des 3. Projektleitertreffens in Berlin. Gebäude und Quartiere der Zukunft: Wie neue Konzepte und Technologien Klimaschutz und Wirtschaftlichkeit vereinbaren können. ISBN: 978-3-942789-89-9
- Gebäude und Quartiere der Zukunft
- Messleitfaden für Demonstrationsvorhaben im Bereich „Energie in Gebäuden und Quartieren“ Erhorn-Kluttig, H., Erhorn, H., Reiß, J., Sinnesbichler, H., Kirnats, L., Frisch, J., Krämer, B., Möhlenkamp, M. (2017). Messleitfaden. Messleitfaden für Demonstrationsvorhaben im Bereich „Energie in Gebäuden und Quartieren“. ISBN: 978-3-942789-87-5
- Energieeffizienz und kostensparendes Bauen – ein Widerspruch? Gundlach, A., Hanisch, C., Erhorn-Kluttig, H., Osterhage, T., Wolisz, H., Erhorn, H., Müller, D. (2017). Zusammenfassung des Expertenworkshops der Wissenschaftlichen Begleitforschung. Energieeffizienz und kostensparendes Bauen – ein Widerspruch?. ISBN: 978-3-942789-88-2

Veröffentlichungen der Begleitforschung

2018

- Projektleitertreffen:** Wissenschaftliche Begleitforschung ENERGIEWENDEBAUEN (hrsg.) (2018). Dokumentation des 4. Projektleitertreffens in Essen. Zukunftsweisende Versorgungsstrategien für Quartiere. ISBN: 978-3-942789-90-5
-
- „Sektorenkopplung“** Kharboutli, S., Flemming, S., Bretschneider, P. (2018). Tiefenbohrung. „Sektorenkopplung“. ISBN: 978-3-942789-96-7
-
- Bericht Trendanalyse 2016** Schnier, M., Schill, C., Wrobel, P., Beier, C., Henn, S., Hanisch, C., Möhlenkamp, M., Osterhage, T., Müller, D., Erhorn-Kluttig, H., Erhorn, H., Lyslow, L., Kharboutli, S., Bretschneider, P. (2018). Querauswertung. Bericht Trendanalyse 2016. ISBN: 978-3-942789-92-9
-
- Querauswertung Bericht Trendanalyse 2017** Schnier, M., Schill, C., Beier, C., Henn, S., Hanisch, C., Osterhage, T., Müller, D., Erhorn, H., Lyslow, L., Erhorn-Kluttig, H., Kharboutli, S., Flemming, S. (2018). Querauswertung Bericht Trendanalyse 2017. ISBN: 978-3-942789-93-6
-
- Integration erneuerbarer Energien in Wärmenetze** Schnier, M., Schill, C., Seelig, T., Beier, C. (2018). Tiefenbohrung. Integration erneuerbarer Energien in Wärmenetze. ISBN: 978-3-942789-94-3

Veröffentlichungen der Begleitforschung

Konzept zur netzreaktiven Gestaltung von Einzelgebäuden Henn, S., Osterhage, T., Müller, D., Kharboutli, S., Flemming, S. (2018). Querauswertung. Konzept zur netzreaktiven Gestaltung von Einzelgebäuden. ISBN: 978-3-942789-91-2

Energetische Gebäude- und Quartiersbilanzierung bei Anwendung von Primärenergiefaktoren und CO₂-Äquivalenten Lyslow, L., Erhorn-Kluttig, H., Erhorn, H. (2018). Tiefenbohrung. Energetische Gebäude- und Quartiersbilanzierung bei Anwendung von Primärenergiefaktoren und CO₂-Äquivalenten. ISBN: 978-3-942789-98-1

Einblick in die Entwicklungen und Anwendungen der Forschungsinitiative ENERGIEWENDEBAUEN Kirnats, L., Joost, J.-N., Berg, S., Frisch, S., van Treeck, C. (2018). Tiefenbohrung. Digitale Werkzeuge und softwarebasierte Lösungsansätze. Einblick in die Entwicklungen und Anwendungen der Forschungsinitiative ENERGIEWENDEBAUEN. 978-3-942789-95-0

Wärmepumpenanwendungen in Forschung und Praxis Henn, S. (2018). Tiefenbohrung. Wärmepumpenanwendungen in Forschung und Praxis. ISBN: 978-3-942789-97-4

2019

Projektleitertreffen: Kälte und Kühlung – aktive und passive Konzepte Wissenschaftliche Begleitforschung ENERGIEWENDEBAUEN (hrsg.) (2019). Dokumentation des 5. Projektleitertreffens in Detmold. Kälte und Kühlung – aktive und passive Konzepte. ISBN: 978-3-942789-99-8

Veröffentlichungen der Begleitforschung

Projektleitertreffen: Wissenschaftliche Begleitforschung ENERGIEWENDEBAUEN (hrsg.) (2019). Dokumentation des 6. Projektleitertreffens in Potsdam. Cross-sektorale Campus-Konzepte für die Wärmewende. ISBN: 978-3-948234-86-7

2020

Leitfaden: Modellseitige
Kopplung

Kirnats, L., Frisch, J., Paepcke, A., Nicolai, A., (2020). Wissenschaftliche Begleitforschung ENERGIEWENDEBAUEN. Leitfaden: Modellseitige Kopplung. ISBN: 978-3-948234-89-8

Projektleitertreffen:
Werkzeuge für die
Energiewende

Wissenschaftliche Begleitforschung ENERGIEWENDEBAUEN (hrsg.) (2020). Dokumentation des 7. Projektleitertreffens in Garching bei München. Werkzeuge für die Energiewende. ISBN: 978-3-948234-87-4

Transfer von
Forschungsergebnissen in
die Praxis

Aschhoff, K., Welter, S., Osterhage, T., Müller, D., (2020). 3. Think Tank ENERGIEWENDEBAUEN. Transfer von Forschungsergebnissen in die Praxis: Wie kann die Rolle der Verbände im Bereich Energiewendebauen gestärkt werden?. ISBN: 978-3-948234-90-4

Tabellenverzeichnis

Vor- und Nachteile von Fragebögen als Datenerhebungsverfahren [8]	Tabelle 3.2-1	S. 47	Clusterung der verschiedenen Anwendungsgebiete für Energiespeicher [eigene Darstellung, auf Basis von [10]]	Tabelle 8.3-1	S. 217
Kennzahlen der gefilterten Kennwörter der Quartiersprojekte	Tabelle 3.5-2	S. 60	Vergleich simulierter Wärmepumpenheizbetrieb eines Bürogebäudes für das Jahr 2018 mit Standardregelung und modellprädiktiver Regelung (optimiert nach Energieeffizienz bzw. Netzdienlichkeit mit Variation der Speicherüberhitzungstemperatur). Stromkosten basieren auf variablen EEX-Börsenpreis mit fiktivem Fixkostenaufschlag von 20 Cent/kWh _{el} .	Tabelle 8.6-1	S. 233
Beteiligung an den quantitativen Umfragen	Tabelle 3.6-1	S. 63	Vergleich verschiedener Wärmepumpenregelungen im HIL-Versuch	Tabelle 8.6-2	S. 235
Merkmale der untersuchten Testmethoden	Tabelle 4.6-1	S. 92	Verteilung der genutzten Lizenzierungsmodelle	Tabelle 9.5-1	S. 260
Paarweise Differenzen, Mittelwerte, Standardabweichung (Sigma) und Betrags-Mittelwerte für gerichtet-hemisphärische Transmissionsgrade eines Glas-Textil-Laminats aus photogoniometrischen Messungen an den DITF (imaging sphere IS-SA) und Fraunhofer ISE (3D-scanning photogoniometer pgl). Die Reihenüberschriften sind die θ -Einfallswinkel („klassische“ Einfallswinkel mit Bezug auf die Probenormale), die Spaltenüberschriften die φ -Einfallswinkel (Drehung der Probe innerhalb der eigenen Ebene).	Tabelle 4.6-2	S. 93	Kostenkennwerte für Sanierungen verschiedener Gebäudenutzungen	Tabelle 9.9-1	S. 281
			Allgemeine Eingabeparameter zur Bestimmung der Sanierungsreihenfolgen	Tabelle 9.9-2	S. 282

Mittelwert und Standardabweichung der gemessenen Wärmelastzeitreihen in Abhängigkeit von der Gebäudenutzung	Tabelle 9.9-3	S. 283
Minimum, Maximum, Mittelwert und Standardabweichung der Merkmalszeitreihen	Tabelle 9.9-4	S. 283
Richtwerte für den Wärmeverbrauch nach der Sanierung in Abhängigkeit von der Gebäudenutzungs-kategorie nach VDI 3807	Tabelle 9.9-5	S. 284
Eingabeparameter für die beispielhafte Berechnung des Referenzkennwertes von Gebäuden mit Mischnutzung	Tabelle 9.9-6	S. 284
Barwerte der drei betrachteten Szenarien	Tabelle 9.9-7	S. 290

Abbildungsverzeichnis

Standardansicht der Projektlandkarte mit der geografischen Verortung der Forschungsprojekte	Abb. 1.1-1	S. 27	Kategorische Einteilung der Projekte in den Befragungsphasen 2 (Mehrfachauswahl)	Abb. 3.5-1a	S. 54
Beispielhafte Darstellung des Projektvergleichs	Abb. 1.1-2	S. 28	Kategorische Einteilung der Projekte in den Befragungsphasen 3 (Mehrfachauswahl)	Abb. 3.5-1b	S. 54
Struktur der zentralen Monitoringdatenbank mit funktionalen Bestandteilen	Abb. 2.2-1	S. 34	Häufigkeit gemeinsamer Kategoriezuordnungen	Abb. 3.5-2	S. 54
Oberfläche des BF-Tools: Datenfeldbezeichner	Abb. 2.3-1	S. 36	Zuordnung der Projekte zu einer Förderinitiative in den Befragungsphasen 2 und 3 (Einfachauswahl)	Abb. 3.5-3	S. 55
Nutzung der Toolbox als logische Toolkette von der Datenaufnahme aus Monitoringobjekten bis zur Datenübertragung auf die Monitoringdatenbank	Abb. 2.5-1:	S. 39	Vergleich der Kategorie- und Förderinitiativenzuordnung	Abb. 3.5-4	S. 56
Mechanismus des BF-Tools: Datenübertrager	Abb. 2.5-2	S. 40	Projekttypen und -aktivitäten in Gebäude- und Quartiersprojekten in Befragungsphase 3 (Mehrfachauswahl)	Abb. 3.5-5	S. 56
Prinzipieller Zusammenhang zwischen Knoten und Kanten in Netzdarstellungen	Abb. 3.2-1	S. 48	Technologieverwendung in unterschiedlichen Projekt- und Gebäudetypen	Abb. 3.5-6	S. 57
Struktur des Fragebogens	Abb. 3.3-1	S. 50	Nicht-technische Hemmnisse der Projekte in den Befragungsphasen 2 und 3, die den Verlauf oder den Erfolg des Projekts beeinträchtigt haben (Mehrfachauswahl)	Abb. 3.5-7	S. 58
Flussdiagramm der vorgestellten Methode	Abb. 3.4-1	S. 52			

Ungefilterte Netzdarstellung des gesamten Forschungsbereichs EWB (a) und gefilterte stärkste Knoten und Verbindungen der Netzdarstellung (b)	Abb. 3.5-8	S. 59	CO ₂ -Äquivalenz-Bewertung der 11 Quartiere [4]	Abb. 4.2-1b	S. 75
Mittlerer Grad (a) und Kantendichte der kategorischen Graphen (b)	Abb. 3.5-9	S. 60	Einflüsse, die mit dem Smart Readiness Indicator bewertet werden [Fraunhofer IBP basierend auf [2]	Abb. 4.3-1	S. 76
Gefilterter Graph für die Kategorie Quartier	Abb. 3.5-10	S. 61	Korrelation und Leistungsfähigkeit in fehlerfreien und fehlerbehafteten Systemen Quelle: Fachgebiet Solar- und Anlagentechnik, Universität Kassel	Abb. 4.5-1	S. 84
Änderungen der Knotengrade zwischen den Fragebogenphase 2 und 3	Abb. 3.5-11	S. 61	Vierstufiges Konzept der algorithmenbasierten Funktionskontrolle. Quelle: Fachgebiet Solar- und Anlagentechnik, Universität Kassel	Abb. 4.5-2	S. 86
Summe der beantworteten Fragen innerhalb der Kategorien	Abb. 3.6-1	S. 62	Vorhergesagtes und simuliertes $\hat{f}_{sav,use}$ (links) und Verteilungen der relativen Abweichungen (rechts): blau ohne Korrekturtherme, magenta mit Korrekturthermen Quelle: Fachgebiet Solar- und Anlagentechnik, Universität Kassel	Abb. 4.5-3	S. 87
Trendlinie der Antworten in der gesamten Gebäudekategorie	Abb. 3.6-2	S. 63			
Summe der Datenpunkte und Beantwortungen jeder Kategorie und Unterkategorie in Phase 3	Abb. 3.6-3	S. 64			
Ergebnis des Fragebogens: Welche Art von Methode oder Konzept entwickeln Sie bzw. optimieren Sie bzw. wenden Sie an? Mehrfachantworten waren möglich	Abb. 4.1-1	S. 71	Einflüsse Messunsicherheiten im FSC-fsav-Diagramm exemplarisch für drei Systeme Rote Ellipse = einfache Sensorik und grüne Ellipse = verbesserte Sensorik [Fachgebiet Solar und Anlagentechnik, Universität Kassel]	Abb. 4.5-4	S. 88
Primärenergetische Bewertung der 11 Quartiere [4]	Abb. 4.2-1a	S. 74			

Priorisierte Fehlerliste eines solarunterstützten Heizungssystems [Fachgebiet Solar- und Anlagentechnik, Universität Kassel]	Abb. 4.5-5	S. 88	Oben: Darstellung der Radarmessung eines Lochkalksandsteins; unten: Überlagerung mit einem Foto der vermessenen Steine. [DLR]	Abb. 4.7-3	S. 103
Winkelkonvention für die Beleuchtungsrichtung von Textilproben [DITF]	Abb. 4.6-1	S. 94	Systemgrenzen, Teilsystemgrenzen und Energieflüsse in einem Fernwärmesystem	Abb. 4.8-1	S. 107
Entscheidungsbaum zur Notwendigkeit von Polarisatoren zwischen Lichtquelle und Probe bei winkelabhängigen Messungen von Transmissions- und Reflexionsgraden. Links: wenn richtige Mittelwerte für vollständig nichtpolarisiertes Licht ausreichen (Licht mit Polarisationsgrad = 0); rechts: wenn richtige Werte für s- und p-polarisiertes Licht getrennt benötigt werden [Fraunhofer ISE]	Abb. 4.6-2	S. 95	Messdatenzentralisierung in Fernwärmesystemen	Abb. 4.8-2	S. 109
Ablauf zur Ermittlung der BSDF und des winkelabhängigen g-Werts (nordamerikanische Abkürzung: DSHGC) von einem Fenstersystem, das aus einer Verglasung und einem Sonnenschutz besteht. [Fraunhofer ISE, nach [14]]	Abb. 4.6-3	S. 96	Online-Fragebogen der BF: Welchem Projekttyp ordnen Sie die Untersuchungen zu? (Antworten zu 118 Gebäuden, Mehrfachauswahl möglich)	Abb. 5.1-1	S. 118
Links: Photogrammetrisch erzeugte Punktwolke; rechts: Daraus errechnetes 3D-Flächenmodell [DLR]	Abb. 4.7-1	S. 101	Online-Fragebogen der BF: Welche Projektaktivität(en) setzen Sie in Ihrem Gebäude um? (Antworten zu 118 Gebäuden, Mehrfachauswahl möglich)	Abb. 5.1-2	S. 118
3D-Modell für ein Stadtquartier. [DLR]	Abb. 4.7-2	S. 101	Energieverbrauch und Anzahl je Gebäudetyp	Abb. 5.2-1	S. 120
			Online-Fragebogen der BF: Um welchen Wohngebäudetyp handelt es sich? (Antworten zu 49 Gebäuden)	Abb. 5.2-2	S. 120
			Online-Fragebogen der BF: Bitte geben Sie die Eigentumsverhältnisse in Ihrem Gebäude in Prozent an. (Antwort zu 57 Gebäuden)	Abb. 5.2-3	S. 121

Online-Fragebogen: Um welchen Nichtwohngebäudetyp handelt es sich? (Antworten zu 72 Gebäuden)	Abb. 5.2-4	S. 122	Mediane der relativen Luftfeuchtigkeit während der Nutzung in Abhängigkeit zur Außentemperatur [IFE TH OWL]	Abb. 5.6-4	S. 133
Online-Fragebogen: Wie lange dauerten bzw. werden die Sanierungsmaßnahmen voraussichtlich dauern? (Antwort zu 17 Gebäuden)	Abb. 5.3-1	S. 123	Mediane des CO ₂ -Gehalts der Innenraumluft im Bestand und Sanierung in Abhängigkeit zur Außenlufttemperatur [IFE TH OWL]	Abb. 5.6-5	S. 133
Online-Fragebogen: Was ist der Fokus bei Ihrer Bestandsanalyse und Sanierung/Optimierung? (Antworten zu 46 Gebäuden)	Abb. 5.4-1	S. 124	Ansicht des degewo Zunkunftshauses vor der Sanierung [degewo]	Abb. 5.7-1a	S. 135
Online-Fragebogen: Mit welchem Ziel führen Sie die Betriebsoptimierung durch? Welchen Gebäudetyp betrachten Sie in Ihrem Projekt? (Antworten zu 28 Gebäuden)	Abb. 5.4-2	S. 124	Ansicht des degewo Zunkunftshauses nach der Sanierung [HTW Berlin].	Abb. 5.7-1b	S. 135
Primärenergetische Plusenergiebilanz Detmolder Plus-Energie Berufskolleg [IFE TH OWL]	Abb. 5.6-1	S. 130	Tagesbilanz für den Energieein- und -austrag des NT-Erdreichspeichers (positiv = Eintrag), die mittlere Speichertemperatur und die mittlere Erdreichtemperatur neben dem Speicher im Messzeitraum. Ereignisse: (1) Beginn der Heizperiode, (2) Nahwärme zugeschaltet, (3) Beginn Speicherbeladung.	Abb. 5.7-2	S. 137
Betriebszeiten und Sollwerteinstellung Heizungsverteiler Detmolder Plus-Energie Berufskolleg [IFE TH OWL]	Abb. 5.6-2	S. 131			
Jahresbilanz Energieverbrauch Klassenraum (klima- und standortbereinigt); bezogen auf die Nettogrundfläche der betrachteten Klassenräume [IFE TH OWL]	Abb. 5.6-3	S. 132			

Prognostizierte und gemessene spez. thermische Erträge der PVT-Anlage (Säulen) sowie solare Einstrahlung (Linien) auf Basis von Monatswerten. Die gesamte Aperturfläche der PVT-Anlage beträgt 189 m ² . Die Betriebsverbesserungen der PVT-Anlage, allerdings auch die niedrigen Temperaturen im Erdreichspeicher, führen zu einem Jahresertrag im Bereich von 74 MWh bis 78 MWh (Vergleich Prognose: 44 MWh).	Abb. 5.7-3	S. 138	Herleitung der Kennlinie durch Regression	Abb. 5.8-3	S. 147
			Aggregiertes Aktivitätsprofil einer RLT-Anlage	Abb. 5.8-4	S. 148
			Fehlererkennung mit Maschinellen Lernen (Probe mit Realdaten)	Abb. 5.8-5	S. 148
			Standorte der ausgewerteten Quartiersprojekte	Abb. 6.2-1	S. 160
			Allgemeine Beschreibung der Forschungsvorhaben der Projekte in Schlagwörtern	Abb. 6.2-2	S. 160
Erzeugungs- und Lastprofil für einen ausgewählten Wintertag (15.01.2018) und einen Sommertag (07.06.2018) mit jeweils jahreszeitlich guten solaren Einstrahlungsbedingungen	Abb. 5.7-4	S. 139	Fokus & Untersuchungsgegenstand der im Projekt betrachteten Methode bzw. Konzept	Abb. 6.2-3	S. 161
Endenergetische Gesamtbilanz des degewo Zukunfthauses auf Basis von jährlichen Energiekennzahlen. Verbräuche sind positiv und Gutschriften negativ dargestellt. Der Anteil zur Bereitstellung der Heizenergie ist witterungsbereinigt. Energiebezugsfläche ist die Nettoraumfläche (4.392 m ²).	Abb. 5.7-5	S. 140	Betrachtete Siedlungstypen in den ausgewerteten Quartieren	Abb. 6.2-4	S. 161
			Siedlungstypologie-Matrix ausgewerteter Förderprojekte, aktuelle und vorherige BF	Abb. 6.2-5	S. 162
			Betrachtete Sektoren in den Quartieren	Abb. 6.2-6	S. 163
Ablauf einer AKS-Analyse	Abb. 5.8-1	S. 146	Betrachtung von Versorgungsnetzen in den Quartieren	Abb. 6.2-7	S. 163
Zerlegung in Wochenabschnitte und Aufsummierung zur Normwoche	Abb. 5.8-2	S. 146	Betrachtete Technologien in den Quartieren mit Angabe des Siedlungstyps	Abb. 6.2-8	S. 164

Betrachtete Technologien in den Quartieren mit Angabe der Altersstruktur der Gebäude	Abb. 6.2-9	S. 165	Gemessene monatliche PV-Stromproduktion und Bedarf von fünf intensiv gemonitorten Gebäuden ohne Batteriespeicher während der letzten drei Jahre (Quelle: Robin Zeh, [2])	Abb. 6.3-7	S. 173
Energiespeicher in den Quartieren mit Angabe des Siedlungstyps	Abb. 6.2-10	S. 165	Bebauung Waldlehne, Margarethenhöhe Essen (Quelle: Christiane Ditzen, Universität Stuttgart)	Abb. 6.4-1	S. 177
Plusenergiesiedlung Wüstenrot (Foto: zafh.net/Pietzsch)	Abb. 6.3-1	S. 169	Bebauung Kleiner Markt, Margarethenhöhe Essen (Quelle: Christiane Ditzen, Universität Stuttgart)	Abb. 6.4-2	S. 177
Verlegung des Agrothermiekollektors (Foto: zafh.net/Pietzsch)	Abb. 6.3-2	S. 169	Die historische Entwicklung von Wärmenetzen, eigene Darstellung nach [11]	Abb. 7.2-1	S. 190
TDie Plusenergiesiedlung Vordere Viehweide (Quelle: Marcus Brennenstuhl, [2])	Abb. 6.3-3	S. 170	Häufigkeit einzelner Energieträger nach Netzen (enthält Mehrfachangaben)	Abb. 7.2-2	S. 191
Struktur der Wärme- und Stromenergieversorgung der Plusenergiesiedlung in Wüstenrot (Quelle: Marcus Brennenstuhl, [3])	Abb. 6.3-4	S. 170	Energieträger je Anlagentyp im Netz (enthält Mehrfachangaben)	Abb. 7.2-3	S. 192
Thermische Aktivierung des Untergrundes durch Einlassen von Rohrleitungen mit einem Spezialpflug (Quelle: Doppelacker GmbH)	Abb. 6.3-5	S. 171	Summe der installierten thermischen Leistung je Wärmeerzeugertyp (EE-Wärmeerzeuger in grüner Schrift)	Abb. 7.2-4	S. 192
Vergleich der Vorlauftemperatur des KNW-Systems mit der Umgebungstemperatur und Darstellung der jeweils erzielten monatlichen Arbeitszahl (Quelle: Robin Zeh)	Abb. 6.3-6	S. 173	Anzahl der Wärmespeicher pro Netz	Abb. 7.2-5	S. 193
			Systemtemperaturen in den Wärmenetzen (für Netze ohne Beschriftung liegen keine Informationen zum Anlagentyp vor; der angegebene Energieträger steht gegebenenfalls in Klammern)	Abb. 7.2-6	S. 194

Darstellung Sektorenkopplung und Energiespeicher (nach [13])	Abb. 7.2-7	S. 196	Aufteilung des Untersuchungsgegenstandes im Bereich der anlagentechnischen Komponenten- und Systemkategorien in der Förderinitiative	Abb. 8.3-1	S. 214
Illustration eines energiemedienübergreifenden Smart Grids [© TU Berlin]	Abb. 7.3-1	S. 200	Im Rahmen der Förderinitiative betrachtete Wärmequellen und -erzeuger	Abb. 8.3-2	S. 215
Eisspeicher des Technologiezentrums [© A. Hanßke]	Abb. 7.3-2	S. 201	Anwendungsbereiche der unterschiedlichen Wärmespeicher in der Förderinitiative	Abb. 8.3-3	S. 218
Zusammenhang zwischen Effizienz (Leistungszahl) eines Kälteerzeugers, Auslastung und Außentemperatur [© TU Berlin]	Abb. 7.3-3	S. 202	Funktionalitäten und schematische Darstellung des MuFuBisS – Wandelementes	Abb. 8.5-1	S. 222
Lade- und Entladevorgang eines Eisspeichers [© TU Berlin]	Abb. 7.3-4	S. 202	GVI-Paneel	Abb. 8.5-2	S. 223
Kälteerzeugung und Speichernutzung in Abhängigkeit von der Verfügbarkeit erneuerbarer Energien [© TU Berlin]	Abb. 7.3-5	S. 204	Dämmeigenschaften unterschiedlicher Dämmverfahren	Abb. 8.5-3	S. 223
Schematische Darstellung des Solernetzes in Berlin Adlershof, © TU Berlin]	Abb. 7.3-6	S. 204	Demonstrator	Abb. 8.5-4	S. 225
Gegenüberstellung der baulichen Komponenten im Rahmen der Förderinitiative	Abb. 8.2-1	S. 211	Einbau des Demonstrators in das Small House	Abb. 8.5-5	S. 226
Anwendungshäufigkeit von Dämmmaterialien und -konzepten in der Förderinitiative	Abb. 8.2-2	S. 212	Gebäude InnoLiving mit den einzelnen Komponenten zur Wärmeenergieversorgung	Abb. 8.5-6	S. 227

Schematische Darstellung der Komponenten für die autarke Wärmeenergieversorgung	Abb. 8.5-7	S. 227	Monatliche Strombilanz [2]	Abb. 8.7-6	S. 244
			Monatliche Wärmebilanz [2]	Abb. 8.7-7	S. 244
Zusammenhänge der Anforderungen an ein netzdienliches Gebäude [Hochschule Biberach]	Abb.8.6-1	S. 231	Ökologische Bewertung anhand CO ₂ -Emissionen	Abb. 8.7-8	S. 245
Prinzip der Hardware-in-the-Loop-Messkampagne	Abb. 8.6-2	S. 234	Flächenspezifische Annuitäten (netto) bzgl. 150.000 m ² _{BGF}	Abb. 8.7-9	S. 245
HIL-Messung netzdienliche Wärmepumpenregelung (MPC in grün, abgeleitete Regeln in blau, Netzsignal und emulierter Gebäudeheizbedarf schwarze Linie/gepunktet im oberen Diagramm, Speichersolltemperatur im unteren Diagramm in schwarz)	Abb. 8.6-3	S. 235	Phasen des Entwicklungsprozesses	Abb. 9.4-1	S. 254
			Entwicklung von softwarebasierten Lösungen in Forschungsprojekten	Abb. 9.5-1	S. 255
			Klassifizierung von softwarebasierten Lösungsansätzen	Abb. 9.5-2	S. 256
			Spektrum der Modellierung	Abb. 9.5-3	S. 257
Seit 1995 in Deutschland errichtete SuN-Anlagen mit saisonaler Wärmespeicherung [2]	Abb. 8.7-1	S. 240	Skalen der Modellierung	Abb. 9.5-4	S. 258
Bauformen saisonaler Wärmespeicher [2]	Abb. 8.7-2	S. 241	Verwendete Programmiersprachen in der Entwicklung	Abb. 9.5-5	S. 258
Langzeitauswertung der SuN-Anlage München Ackermannbogen [2]	Abb. 8.7-3	S. 241	Angestrebte Lizenzierung der Entwicklung	Abb. 9.5-6	S. 259
Schema des Energieversorgungskonzeptes „P2H Quartier“ [2]	Abb. 8.7-4	S. 243	Netzwerkanalyse des Tools-Ökosystems der EWB-Forschungsprojekte	Abb. 9.5-7	S. 261
Jahresbilanz der Nutzung des PV-Stroms für Strom und Wärme [2]	Abb. 8.7-5	S. 244	Gewichteter Vernetzungsgrad	Abb. 9.5-8	S. 262
			Verteilung von Entwicklungsstandorten nach Toolanzahls	Abb. 9.5-9	S. 263

Beispiel für die Anzeige der zeitlichen Änderungen in einer Quelltextdatei, oben – Anzeige der Unterschiede zwischen zwei Arbeitsständen, unten – farbliche Hervorhebung des zeitlichen Änderungsverlaufs	Abb. 9.7-1	S. 268	Szenario A–Investment and budget limit	Abb. 9.9-4d	S. 289
			Szenario B–Investment and budget limit	Abb. 9.9-4e	S. 289
			Szenario C–Investment and budget limit	Abb. 9.9-4f	S. 289
Beispiel für die Übersichtsseite eines automatisierten Erstellungs- und Testsystems. Die Symbole in den ersten Spalten geben Auskunft über Erfolg und Fehlschlag und die Häufigkeit von Fehlern	Abb. 9.7-2	S. 270	Schematische Darstellung zur Lastprognose von sanierten Gebäuden	Abb. 9.9-5	S. 291
			Prognostizierter Wärmeleistungsbedarf (Minimum, Mittelwert, Median, Maximum) basierend auf Szenario A	Abb. 9.9-6	S. 291
Grundprinzip der Generierung von Oberflächen für ein Informationssystem	Abb. 9.8-1	S. 275	Prognostizierter Wärmeleistungsbedarf (Minimum, Mittelwert, Median, Maximum) basierend auf Szenario B	Abb. 9.9-7	S. 291
Geordnete Jahresdauerlinien der Außentemperatur in Bezug auf den aktuellen und den zukünftigen TRY	Abb. 9.9-1	S. 283	Prognostizierter Wärmeleistungsbedarf (Minimum, Mittelwert, Median, Maximum) basierend auf Szenario C	Abb. 9.9-8	S. 291
Methodisches Verfahren zur Berechnung witterungsabhängiger und witterungsunabhängiger Wärmeleistungsanteile	Abb. 9.9-2	S. 287	Vergleich der prognostizierten maximalen Wärmeleistungsschwankungen auf Quartiersebene über die Zeit	Abb. 9.9-9	S. 292
Schematische Darstellung zur Lastprognose von sanierten Gebäuden	Abb. 9.9-3	S. 288	Szenarioübergreifende Darstellung der prognostizierten Jahresdauerlinien für 2025	Abb. 9.9-10	S. 292
Szenario A–Retrofit order	Abb. 9.9-4a	S. 289			
Szenario B–Retrofit order	Abb. 9.9-4b	S. 289	Szenarioübergreifende Darstellung der prognostizierten Jahresdauerlinien für 2050	Abb. 9.9-11	S. 293
Szenario C–Retrofit order	Abb. 9.9-4c	S. 289			

Abkürzungsverzeichnis

°C	Grad Celsius	CO ₂	Kohlenstoffdioxid
a	Jahr	csv	comma-seperated values
Abb.	Abbildung	d. h.	das heißt
AC	Wechselstrom	degewo	Deutsche Gesellschaft zur Förderung des Wohnungsbaues
AGFW	Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und Kraft-Wärme-Kopplung	dena	Deutsche Energieagentur
AKS	Anlagenkennzeichnungssystem	DGNB	Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen
allg.	allgemein	DIN	Deutsches Institut für Normung
AMEV	Arbeitskreis Maschinen- und Elektrotechnik staatlicher und kommunaler Verwaltungen	DITF	Deutsche Institute für Textil- und Faserforschung Denkendorf
API	Anwendungsprogrammierschnittstelle	DLR	Deutsches Luft- und Raumfahrtzentrum
ARI-MA	Autoregressive Integrated Moving Average	DN	Nennweite
AST	Fraunhofer-Institutteil für Angewandte Systemtechnik	DSL	domänenspezifische Sprache
AZ	mittlere monatliche Arbeitszahl	DSM	Demand-Side-Management
BC	Betweenness Centrality	DWD	Deutscher Wetterdienst
BDH	Bundesverband der Deutschen Heizungsindustrie	e.V.	eingetragener Verein
BF	Wissenschaftliche Begleitforschung	e3d	Lehrstuhl für Energieeffizientes Bauen
BHKW	Blockheizkraftwerk	ebc	Institute for Energy Efficient Buildings and Indoor Climate
BIM	Building Information Modeling	EE	Erneuerbare Energien
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie	EEX	European Energy Exchange
BSDF	bidirektionale Streuverteilungsfunktionen	EK	Energiekosten
bspw.	beispielsweise	EnBau	Energieoptimierte Neubauten
BTA	Bauteilaktivierung	EnBop	Energetische Betriebsoptimierung
BUDO	Buildings Unified Data point naming schema for Operation management	EnEff	Energieeffiziente/r/s
bzgl.	bezüglich	EnEV	Energieeinsparverordnung
bzw.	beziehungsweise	engl.	englisch
ca.	circa	EnOB	Energieoptimiertes Bauen
CEA	Französische Kommission für alternative Energien und Atomenergie	EnQM	Energieoptimiertes Quartier Margarethenhöhe Essen
CMMI	Capability Maturity Model Integration	EnSan	Energieoptimierte Sanierung
		EPBD	Europäische Gebäudeenergieeffizienzrichtlinie
		EPS	Expandiertes Polystyrol

et al.	et alii, et aliae, et alia. und andere	INES	Nationales Institut für Sozialenergie
etc.	et cetera	inkl.	inklusive
EU	Europäische Union	insbes.	insbesondere
EUR	Euro	IoT	Internet of Things
EVG	Eigenversorgungsgrad	ISE	Fraunhofer-Institut für Solarenergie
EWB	Energiewendebauen	ISO	Internationale Organisation für Normung
FDD	Fehlerdetektion und-diagnose	IS-SA	Imaging Sphere for Scatter Appearance Measure- ment
FKB	Faserkunststoffbewehrung		
FKZ	Förderkennzeichen	IT	Informationstechnologie
FSC	Fractional Solar Consumption	JAZ	Jahresarbeitszahl
FTP	Dateiübertragungsprotokoll	K	Kelvin
FVK	Faserverbundkunststoff	KEV	kumulierter Energieverbrauch
FW	Fernwärme	KF	korrelationsinhärenter Unsicherheitsbereich
geea	Allianz für Gebäude-Energie-Effizienz	KFFS	Komplexe Fenster- und Fassadensysteme
GEG	Gebäudeenergiegesetz	KfW	Kreditanstalt für Wiederaufbau
GFK	glasfaserverstärkter Kunststoff	kg	Kilogramm
ggf.	gegebenenfalls	KG	Kostengruppe
GHD	Gewerbe- / Handels- / Dienstleistungssektor	kHz	Kilohertz
GmbH	Gesellschaft mit beschränkter Haftung	kJ	Kilojoule
GSC	Grid Support Coefficient	KUE	Luftkühler
GUI	graphische Benutzeroberfläche	kW	Kilowatt
GVI	gestützte Vakuum-Isolierung	kWh	Kilowattstunden
h	Stunde	kWp	kilo Watt peak
HDF	Hierarchical Data Format	LZWSp	Langzeitwärmespeicher
HDPE	Hart-Polyethylen	m ²	Quadratmeter
HIL	Hardware-in-the-Loop	m ² a	Quadratmeter und Jahr
HTW	Hochschule für Wirtschaft und Technik	m ³	Kubikmeter
i. d. R.	in der Regel	MAD	lokaler Median absoluter Abweichungen
i.A.	im Anwendungsfall	MB	Megabyte
IBP	Fraunhofer-Institut für Bauphysik	MFH	Mehrfamilienhaus
IEA	International Energy Agency	Mio.	Millionen
IKT	Informations- und Kommunikationstechnik	mK	Minikelvin

MPC	modellprädiktive Regelung	Signaleing.	Signaleingang
Mrd.	Milliarden	SPEC	Specification
MTBF	Mittlerer Ausfallabstand zwischen Störungen eines Erzeugers	SPICE	Software Process Improvement and Capability Determination
MW	Megawatt	SPL	Softwareproduktlinien
MWh	Megawattstunden	SQL	Structured Query Language
NaN	Not a Number	SRI	Smart Readiness Indicator
NE	Luftnacherhitzer	St.	Stück
NIR	Nahinfrarotspektroskopie	SuN	solarunterstützte Nahwärmeversorgungskonzepte
NLP	Natural Language Processing	t	Tonnen
nm	Newtonmeter	TH	Technische Hochschule
NPV	Kapitalwertmethode	TRL	Technology Readiness Level
NRF	Nettoraumfläche	TRY	Test Reference Years
NT	Niedrigtemperatur	TU	Technische Universität
OWL	Ostwestfalen-Lippe	TWh	Terrawattstunden
p.a.	pro Jahr	TWW	Trinkwarmwasserbereitung
P2G	Power-To-Gas	u. a.	unter anderem
P2H	Power-To-Heat	UAV	unbemanntes Luftfahrzeug
P2L	Power-To-Liquid	UI	Benutzerschnittstelle
PCM	Phasenwechselmaterial	UMSICHT	Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik
PEF	Primärenergiefaktor	US	Vereinigte Staaten
pers.	Person	USA	Vereinigte Staaten von Amerika
PL	Projektleiter	usw.	und so weiter
PNZ	Primärenergie-Nutzungszahl	UV	Ultraviolettstrahlung
ppm	Anteile pro Million	v.a.	vor allem
PtJ	Projektträger Jülich	VBA	Virtual Basic for Applications
PV	Photovoltaik	VCS	Versionskontrollsystem
PVT	photovoltaisch-thermische Hybridmodule	VDI	Verein Deutscher Ingenieure
rd.	rund	VE	Luftvorerhitzer
RES	Residuallast	Vent	Ventilator
RLT	raumluftechnisch	vgl.	vergleiche
RMSE	Mittleres Abweichungsquadrat	VIP	Vakuumsisolationspaneel
RWTH	Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule	VIS	Visuelles Spektrum
SHC	Solar Heating and Cooling Programme		

W	Watt
WDVS	Wärmedämmverbundsystem
WE	Wohneinheit
WP	Wärmepumpen
Wp	Watt peak
WPV	Anteil von Wind und Photovoltaik im nationalen Strommix
WRG	Wärmerückgewinnung
z. T.	zum Teil
z. B.	zum Beispiel
ZKH	Zukunftshaus

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Impressum

Herausgeber: Wissenschaftlich Begleitforschung ENERGIEWENDEBAUEN
RWTH Aachen
Lehrstuhl für Gebäude- und Raumklimatechnik
Mathieustraße 10
52074 Aachen

Email: begleitforschung@eonerc.rwth-aachen.de
Internet: energiewendebauen.de

Autoren: Prof. Dr.-Ing. Dirk Müller unter Mitwirkung aller Mitglieder der Wissenschaftlichen Begleitforschung ENERGIEWENDEBAUEN
Umschlaggestaltung, Illustration: RWTH Aachen, Lehrstuhl für Gebäude- und Raumklimatechnik
Verlag: Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart
© 2020

Für den Inhalt und das Bildmaterial der einzelnen Beiträge tragen die Autoren die Verantwortung. Alle Rechte vorbehalten. Kein Teil des Werks darf in irgendeiner Form (Druck, Fotokopie oder in einem anderen Verfahren) ohne schriftliche Genehmigung des Herausgebers reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek: Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

ISBN: 978-3-948234-88-1
ISBN: 978-3-7388-0519-2 (Fraunhofer IRB, Print)
ISBN: 978-3-7388-0520-8 (Fraunhofer IRB, E-Book)
Druck: BoschDruck Solutions GmbH, Ergolding

ISBN 978-3-7388-0519-2



9 783738 805192

Fraunhofer IRB  Verlag