

dem maximalen Durchfluss des Durchlauferhitzers ab; typischerweise liegt diese bei 40 – 50 kW. Verglichen mit den Kosten eines Lithium-Batteriespeichers, ca. 800 €/kWh, sind die Windheizung 2.0-Speicherlösungen somit sehr günstig.

Die unter Verwendung des neuen Auslegungstools durchgeführte Parameterstudie zeigt für die betrachteten Typgebäude Überschussstromdeckungen zwischen 80 und 90 Prozent, teilweise bis zu 100 Prozent. Grundsätzlich bestätigte sich der Zusammenhang zwischen Gebäudeeffizienz und lange Überbrückungsdauer bzw. hohem Deckungsanteil aus Überschussstrom.

Alle basierend auf den Vorgängerstudien ausgewählten Speichervarianten zeigen mit einer CO₂-Reduktion von **7 – 16 kg/(m²a)** auf ihren Lebenszyklus bezogen einen ökologischen Vorteil gegenüber einem Gebäude nach GEG-Standard (Referenzszenario). Basierend auf den Bau- und Energiepreisen zum Betrachtungszeitraum Ende 2021 sind alle definierten Windheizung 2.0-Varianten wirtschaftlich darstellbar, mit Ausnahme solcher, bei denen Decken und Wände gleichzeitig aktiviert werden.

Im Rahmen des Forschungsprojektes wurden sinnvolle Kriterien für den mehrkriteriellen Betrieb der Technologie Windheizung 2.0 gemeinsam mit den beteiligten Netzbetreibern identifiziert. Ein Simulationsmodell für die Erstellung von netz- und marktdienlichen Betriebsempfehlungen, basierend auf historischen Wetterprognosedaten des Deutschen Wetterdienstes, Geoinformationen und Stromnetzinformationen des beteiligten Verteilnetzbetreibers LVN wurde entwickelt. Darüber hinaus wurden Vorschläge für die Flexibilisierung von Strompreisbestandteilen sowie Verfahren für die Prognose von a) transregionalen Stromeinspeisungen von Windenergie- und Photovoltaikanlagen sowie b) Börsenstrompreisen des Day-Ahead Handels der EPEX SPOT für die Deutsch-Luxemburgische Gebotszone vor Handelsschluss erarbeitet. Die Erprobung des Simulationsmodells wurde mit den Projektpartnern im Rahmen von Feldversuchen im Freiland ohne Nutzer von Dezember 2020 - Mai 2022 erfolgreich realisiert.

Das Windheizung 2.0-Konzept mit seiner Regelung, den BTA-Speichern, dem HTSS und dem WWS wird ab dem Jahr 2023 an vier bewohnten Gebäuden im Rahmen eines Demo-Vorhabens über zwei Messwinter weiter evaluiert. Dieses Vorhaben wird vom BMWK unter dem Förderkennzeichen 03EN6013(A) gefördert.

Insgesamt lassen sich viele Erkenntnisse des Projektes bezüglich flexibler, markt- und netzdienlicher Steuerung des Strombezuges auch auf andere potenziell flexible Stromverbraucher wie Wärmepumpen oder Elektrofahrzeuge übertragen. Der Ausbau von erneuerbaren Energien mit volatiler Erzeugung erfordert sowohl den Ausbau von Speichertechnologien als auch die Anpassung des Verbrauchs an die Erzeugung. Die Verbrauchsanpassung ist hier privat- und volkswirtschaftlich die günstigere Alternative und muss daher favorisiert werden.

Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP

Forschung, Entwicklung,
Demonstration und Beratung auf
den Gebieten der Bauphysik

Zulassung neuer Baustoffe,
Bauteile und Bauarten

Bauaufsichtlich anerkannte Stelle für
Prüfung, Überwachung und Zertifizierung

Institutsleitung

Prof. Dr. Philip Leistner

IBP-Abschlussbericht EER-002/2023/720

Thermische Energiespeicher: Windheizung 2.0: Entwicklung von zentralen Hochtemperatur- und Bauteil-Langzeit-Speichern für Windheizung 2.0 Wohngebäude

Verbundkoordination und Evaluierung
der Speicherkonzepte (Förderkennzeichen 03ET1612A)

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Durchgeführt im Auftrag
PTJ Forschungszentrum Jülich
Herr Rohde
52425 Jülich

Der Bericht umfasst
380 Seiten Text
286 Abbildungen
70 Tabellen

*Auszugsweise Veröffentlichung nur mit
schriftlicher Genehmigung des Fraun-
hofer-Instituts für Bauphysik gestattet*

Gruppenleiter

Bearbeiter

Dipl.-Ing.
Herbert Sinnesbichler

Dr.-Ing.
Matthias Kersken

Bearbeiter:

Dr. Matthias Kersken (Projektleiter),
Sebastian Ebertshäuser, Katrin Lenz, Matthias Pazold,
Simon Wössner, Herbert Sinnesbichler (IBP)
Prof. Dr. Mario Adam, Thomas Spiegel (ZIES)
Joachim Durach (CR)
Armin Bühler (Ktop)
Dr. Eberhard Fries, Felix Henrich,
Andreas Weeber (tek)
Michael Huckestein, Peter Lathen, Frank Sachse (KT)
Steffen Licht, Silke Klengler (Rath)
Sebastian Aschenbrenner (LEW/LVN) (LEW)
Dr. Werner Christmann (TenneT TSO)
Dr. Josef Hochhuber (StMWi)
Martina Reinwald, Dr. Stephan Leitschuh (LfU)

Valley, 13. Februar 2023

Inhalt

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Projektziel | 7 |
| 2 | Speicherentwicklung | 10 |
| 2.1 | Entwicklung des Hochtemperatur-Steinspeicher (HTSS) | 10 |
| 2.1.1 | Entwicklung der Speicherstruktur und der Luftführung | 10 |
| 2.1.2 | Festlegung zum Aufbau der Dämmung | 14 |
| 2.1.3 | Auswahl des Steinmaterials | 15 |
| 2.1.4 | Auswahl der Heizstäbe | 16 |
| 2.1.5 | Einbindung des Speichers in die technische Gebäudeausrüstung | 18 |
| 2.1.6 | Simulation des HTSS in Realgröße | 19 |
| 2.1.7 | HTSS-System Simulationsmodell | 22 |
| 2.2 | Entwicklung und Optimierung der BTA als Langzeit-Speicher | 30 |
| 2.2.1 | Aufbau der BTAs | 30 |
| 2.2.2 | Bewertung der umlaufenden Speicher-Wärmebrücke bei BTA-Speichern | 37 |
| 2.2.3 | Simulation der Neubau-Decken | 44 |
| 2.2.4 | Simulation zur Festlegung der Wärmeleitprofile der BTA-Sanierungs-Varianten | 51 |
| 2.2.5 | Einbindung der BTA-Speicher in die technische Gebäudeausrüstung | 53 |
| 2.2.6 | BTA-Detail-Simulationsmodell | 54 |
| 2.3 | Optimierung und Implementierung von Regelstrategien | 66 |
| 2.3.1 | Definition der Regelungs- und Steuerungsstrategien | 66 |
| 2.3.2 | Definition des Schnittstellenkonzeptes zu den unterschiedlichen Wärmespeichertypen und dem ZIES | 67 |
| 2.3.3 | Definition der Regelungsfunktion zu den unterschiedlichen Wärmespeichertypen | 72 |
| 2.3.4 | Prognose-System des Gebäude-Wärmebedarfs | 73 |
| 2.3.5 | Betriebszustände | 77 |
| 2.3.6 | Optimierte Teilbelastungssimulation | 87 |
| 2.4 | Vorversuche | 90 |
| 2.4.1 | Simulation des HTSS und Kleinversuch | 90 |
| 2.4.2 | Aufbau Vorversuch BTA-Speicher | 95 |
| 2.4.3 | Hydraulische Anbindung der Prüflinge | 101 |
| 2.4.4 | Vorversuch BTA-Speicher – Ablauf und Auswertung | 104 |
| 2.5 | Freiland-Versuche | 116 |
| 2.5.1 | Versuchsaufbau | 117 |
| 2.5.2 | Künstliche Nutzer | 127 |
| 2.5.3 | Rückbau des HTSS | 131 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 3 | Lebenszyklusbasierte Analyse | 140 |
| 3.1 | Windheizung 2.0-Komponenten (Produktebene) | 140 |
| 3.1.1 | Zielstellung | 140 |
| 3.1.2 | Technische Systembeschreibung | 141 |
| 3.1.3 | Funktion und funktionelle Einheit | 141 |
| 3.1.4 | Definition der Systemgrenzen | 141 |
| 3.1.5 | Abschätzungen und Annahmen | 142 |
| 3.1.6 | Einschätzung zur Datenqualität | 143 |
| 3.1.7 | Systemraumerweiterung und Allokation | 143 |
| 3.1.8 | Sachbilanz und Modellbildung | 143 |
| 3.1.9 | Wirkungsabschätzung und Interpretation | 144 |
| 3.1.10 | Auswertung und Interpretation | 144 |
| 3.2 | Windheizung 2.0-Konzepte (Konzeptebene) | 158 |
| 3.2.1 | Zielstellung | 158 |
| 3.2.2 | Technische Systembeschreibung | 158 |
| 3.2.3 | Funktion und funktionelle Einheit | 159 |
| 3.2.4 | Definition der Systemgrenzen | 159 |
| 3.2.5 | Abschätzungen und Annahmen | 161 |
| 3.2.6 | Umgang mit dem Gebäudebetrieb | 163 |
| 3.2.7 | Einschätzung zur Datenqualität | 164 |
| 3.2.8 | Systemraumerweiterung und Allokation | 164 |
| 3.2.9 | Sachbilanz und Modellbildung | 164 |
| 3.2.10 | Wirkungsabschätzung | 165 |
| 3.2.11 | Auswertung und Interpretation | 165 |
| | | |
| 4 | Entwicklung Planungs- und Nachweis-Tool | 174 |
| 4.1 | Konzeptionelle und berechnungstechnische Grundlagen der Werkzeugentwicklung | 175 |
| 4.1.1 | Bestimmung der Auslegungsgrößen der Windheizung 2.0 Konzepte | 178 |
| 4.1.2 | Spezifikation des funktionalen Umfangs gemäß den identifizierten Anwendungsfällen | 180 |
| 4.1.3 | Konzeption und der Benutzeroberfläche | 184 |
| 4.2 | Windperiodenverfahren | 186 |
| 4.2.1 | Windheizung 2.0 – GEG-Randbedingungen | 186 |
| 4.2.2 | Windperioden Verfahren – Berechnungslogik idealtypische Speicherentladung | 186 |
| 4.2.3 | Windperiodenverfahren – Bewertung der Windheizung 2.0 durch Bestimmung Überschussstromanteil | 188 |
| 4.2.4 | Weitere erarbeitete Grundlagen der Werkzeugentwicklung - Variantenmatrix | 189 |
| 4.2.5 | Validierung und Justierung des Windperiodenverfahrens | 190 |
| 4.3 | Umsetzung und Bedienoberfläche des Planungstools | 195 |
| 4.3.1 | Der Informationsbereich im Planungstool | 195 |
| 4.3.2 | Standardbasierter Gebäudedatenimport aus dem GEG-Tool in das Windheizung 2.0-Planungstool | 196 |
| 4.3.3 | Windheizung 2.0-Auslegungswerkzeug im Planungstool | 199 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 4.3.4 | Auswertungen im Planungstool | 201 |
| 4.4 | Kostenaufstellung | 203 |
| 5 | Stromnetz Betrachtung und Geschäftsansätze | 204 |
| 5.1 | Definition von Einsatzbereichen des Systems Windheizung 2.0 | 205 |
| 5.2 | Darstellung regulatorischer Rahmenbedingungen | 206 |
| 5.3 | Entwicklung eines Simulationsmodells zur mehrkriteriellen Betriebsoptimierung von Flexibilitätsoptionen mittels Schaltvorschlägen in Form von Fahrplänen | 209 |
| 5.3.1 | Bewegungsdaten | 210 |
| 5.3.2 | Stammdaten | 212 |
| 5.4 | Entwicklung von Schaltvorschlägen in Form von Fahrplänen für die Flexibilitätsoption Windheizung 2.0 | 215 |
| 5.5 | Anwendung des Simulationsmodells im Rahmen von Feldversuchen | 224 |
| 5.6 | Szenario 1: Entwicklung von Schaltvorschlägen in Form von Fahrplänen für die Flexibilitätsoption Windheizung 2.0 für Feldversuche in der Heizperiode 2020/2021 | 226 |
| 5.7 | Szenario 2: Entwicklung von Schaltvorschlägen in Form von Fahrplänen für die Flexibilitätsoption Windheizung 2.0 für den Feldversuch in der Zeitspanne Juni 2021 – Mai 2022 | 227 |
| 5.8 | Erarbeitung von Vorschlägen für die Flexibilisierung von Strompreisbestandteilen | 232 |
| 6 | Ergebnisse | 235 |
| 6.1 | Betriebszustände | 235 |
| 6.2 | Energiebilanzen | 235 |
| 6.2.1 | Neubau-BTA / CUBE | 238 |
| 6.2.2 | Sanierungs-BTA / Zwillingshaus | 246 |
| 6.2.3 | HTSS / Zwillingshaus | 254 |
| 6.2.4 | Überschussstromdeckung | 261 |
| 6.3 | Beladeverhalten der Speicher | 263 |
| 6.3.1 | HTSS | 263 |
| 6.3.2 | BTA | 268 |
| 6.3.3 | Optimierungsbedarf Regelverhalten | 275 |
| 6.4 | Parameterstudie (Windheizung 2.0-Planungstool) | 277 |
| 6.4.1 | Randbedingungen | 277 |
| 6.4.2 | Gesamtauswertung Studienergebnisse | 280 |
| 6.4.3 | Einfluss Überschussstrompreis auf den Kapitalwert | 283 |
| 6.4.4 | Detailbetrachtung Windprofile | 284 |
| 6.4.5 | Gegenüberstellung des Windheizung 2.0-Kriteriums zu verbesserter thermischer Hülle | 286 |
| 6.4.6 | Raumklimaqualität | 288 |
| 7 | Zusammenfassung und Ausblick | 291 |

| | | |
|------------|--|------------|
| 8 | Literaturverzeichnis | 295 |
| A.1 | Betriebszustandskonzepte für Windheizung 2.0 Speicherkonzepte | 299 |
| A.1.1 | Betriebszustände des HTSS | 299 |
| A.1.2 | Betriebszustände des BTA-Speichers | 300 |
| A.1.3 | Betriebszustände WWS | 301 |
| A.1.4 | Messdatenverläufe der Betriebszustände | 302 |
| A.2 | Sachbilanzinventare der Windheizung 2.0- Komponenten (Ökobilanz) | 336 |
| A.2.1 | Sachbilanzinventar des Hochtemperatur-Steinspeichers (HTSS) | 336 |
| A.2.2 | Sachbilanzinventar der Bauteilaktivierung (BTA) Decke, Neubau | 345 |
| A.2.3 | Sachbilanzinventar der Bauteilaktivierung (BTA) Wand, Neubau | 348 |
| A.2.4 | Sachbilanzinventar der Bauteilaktivierung (BTA) Decke, Sanierung | 353 |
| A.2.5 | Sachbilanzinventar der Bauteilaktivierung (BTA) Wand, Sanierung | 355 |
| A.3 | Ökobilanzmodelle der Windheizung 2.0- Komponenten (Ökobilanz) | 357 |
| A.3.1 | Ökobilanzmodell des Hochtemperatur-Steinspeichers (HTSS) | 357 |
| A.3.2 | Ökobilanzmodell der Bauteilaktivierung (BTA) Decke | 359 |
| A.3.3 | Ökobilanzmodell der Bauteilaktivierung (BTA) Wand | 361 |
| A.4 | Ökobilanzmodell zur Entwicklung des deutschen Strom-Mix bis zum Jahr 2050 | 363 |
| A.5 | Eingangsdaten „Ökobilanz Windheizung 2.0- Konzepte“ und „Parameterstudie“ | 370 |
| A.6 | Detailergebnisse Ökobilanz GWP ausgewählter Windheizung 2.0-Konzepte | 375 |
| A.7 | Detailergebnisse Ökobilanz PENRT ausgewählter Windheizung 2.0-Konzepte | 378 |

1 Projektziel

Im Rahmen der Dekarbonisierung der Energieversorgung wird künftig der Bedarf an Strom zur Gebäudebeheizung im Winter stark steigen. Windenergieanlagen sind praktisch die einzigen Erzeuger von erneuerbarem Strom, die (ganz im Gegenteil z.B. zur PV) im Winter ein deutliches Erzeugungsmaximum haben. Vor allem während der winterlichen Starkwindzeiten herrscht im deutschen Stromnetz teilweise sogar ein Überangebot, das dann zu sehr niedrigen bis negativen Preisen an der Strombörse führen kann. In manchen Regionen müssen Windkraftanlagen zur Sicherung der Netzstabilität in der Leistung reduziert oder zeitweise komplett abgeriegelt werden. Gebäude in Deutschland bieten mit ihren großen thermischen Speichermassen enorme Potentiale für die Wärmespeicherung. Je effizienter dabei ein Gebäude ist, umso länger kann die Wärme darin gespeichert werden. Dies ist besonders wichtig, da die Windstromerzeugung stark schwankt und einerseits Überschüsse bei Starkwindereignissen genutzt und gespeichert werden müssen, andererseits windarme Zeiten möglichst ohne Stromabnahme überbrückt werden müssen. Dadurch können die Windheizung 2.0-Gebäude der Zukunft durch die Erzeugung von Wärme aus erneuerbarem elektrischen Strom (Kopplung von Strom- und Wärmesektor, Power-to-Heat) ihren Energiebedarf umwelt- und systemverträglich decken und gleichzeitig zur erfolgreichen Umsetzung der Energiewende beitragen.

Ziel des hier beschriebenen Forschungsvorhabens ist es, unterschiedliche Bauformen von Langzeit-Hochtemperatur-Steinspeichern (HTSS), Wasserspeichern und bauteilintegrierten Langzeitspeichern (BTA) zur Nutzung von Windstrom-Überproduktionen oder anderem Überschussstrom in systemdienlicher Weise zur Gebäudebeheizung zu entwickeln und zu optimieren. Hierzu muss die Speichergröße (Kapazität) dem Heizenergiebedarf des hocheffizienten Gebäudes für ein bis zwei Wochen angepasst werden, da statistisch in diesem Zeitraum Starkwindereignisse zu erwarten sind.

Neben der Optimierung der Laderegulierung der Speicher werden Planungs- und Auslegungshilfen für Fachplaner bereitgestellt. Sie sollen den Markteintritt des Systems Windheizung 2.0 unterstützen.

Ein hoher Dämm- und Effizienzstandard des Gebäudes und ein hocheffektives Wärmeübergabesystem sind Voraussetzungen für einen geringen Heizwärmebedarf. Gebäudetechnisch definiert sich die hohe wärmetechnische Effizienz eines Windheizung 2.0-Gebäudes durch eine Wohnungslüftungsanlage mit einem Wärmerückgewinnungsgrad von über 85 Prozent und einer wärmetauschenden Hüllfläche die maximal den halben Endenergiebedarf nach GEG-Anforderung aufweist. Die entspricht in etwa dem Anforderungsniveau des Passivhauskonzepts. Dadurch kann die Überbrückung der Zeiten zwischen den Starkwindereignissen bzw. der Perioden von Stromengpasszeiten gewährleistet werden. Der ausschließliche Einsatz in hocheffizienten Gebäuden ist auch unabdingbare Voraussetzung dafür, dass das ansonsten systemschädliche und stromverschwendende direktelektrische Heizen gerechtfertigt ist. Das System Windheizung 2.0 kann folglich als sogenannter „funktionaler Stromspeicher“

bezeichnet werden. Es kennzeichnet deutlich längere Zeiträume ohne Strombezug in Stromengpasszeiten sowie eine hohe Leistungsaufnahme, wenn „Überschussstrom“ zur Verfügung steht. Gleichzeitig soll ein lastorientierter Energiebezug durch Abnahme in Zeiten geringer Netzbelastung und Verzicht auf Abnahme in Zeiten hoher Netzbelastung realisiert werden. Damit unterscheidet sich dieser Power-to-Heat-Ansatz deutlich von anderen Power-to-Heat Anwendungen wie beispielsweise Nachtspeicheröfen. Bild 1 veranschaulicht die Flexibilität und die Möglichkeiten des systemdienlichen Einsatzes von Windheizung 2.0 gegenüber anderen Power-to-Heat-Systemen im Gebäudebereich.

Die Balken stellen den Zeitraum und die Höhe des Strombezugs dar. In den Zeiträumen dazwischen erfolgt keine Energieabnahme. Nachtspeicheröfen sind strikt getaktet und weisen kaum Flexibilität auf. Wärmepumpen sind nur bedingt flexibel (kurzzeitiges Abschalten je nach Wärmebedarf für einige Stunden möglich). Sie erfordern zudem teils hohe Investitionen. Elektrische Zusatzheizungen sind punktuell flexibel und mit höherer Leistung als Wärmepumpen zuschaltbar. Allerdings ist für die Grundlast bei elektrischen Zusatzheizungen ein weiteres Heizsystem notwendig, so dass das Gesamtheizsystem hohe Kosten aufweist. Das System Windheizung 2.0 zeichnet sowohl deutlich längere Zeiträume ohne Strombezug als auch eine höhere Leistungsaufnahmemöglichkeit aus.

Die Systemdienlichkeit des Windheizung 2.0 Ansatzes besteht insbesondere darin, dass das Gebäude und sein Heiz-/Speichersystem eine größtmögliche Flexibilität bezüglich der Stromaufnahme aus dem öffentlichen Netz bieten. Damit kann der Strombezug grundsätzlich sowohl marktdienlich (Anpassung der Stromabnahme an die Verfügbarkeit der Erneuerbaren Energien) als auch netzverträglich (Anpassung der Stromabnahme an Kapazität und Auslastung von Übertragungs- und Verteilnetz) erfolgen. Die Flexibilität bedeutet auch, dass sich das Steuerungssignal sowohl am Strommarkt (Börsenpreis Intraday- bzw. Day-Ahead-Handel) als auch an der überregionalen und lokalen technischen Netzsituation (Spannung oder Frequenz) orientieren muss. Dieses maximal systemdienliche Verhalten soll dann die Grundlage bilden, dass der Gesetzgeber für derartig maximal flexible Verbraucher einen besonders günstigen Stromtarif ermöglichen kann.

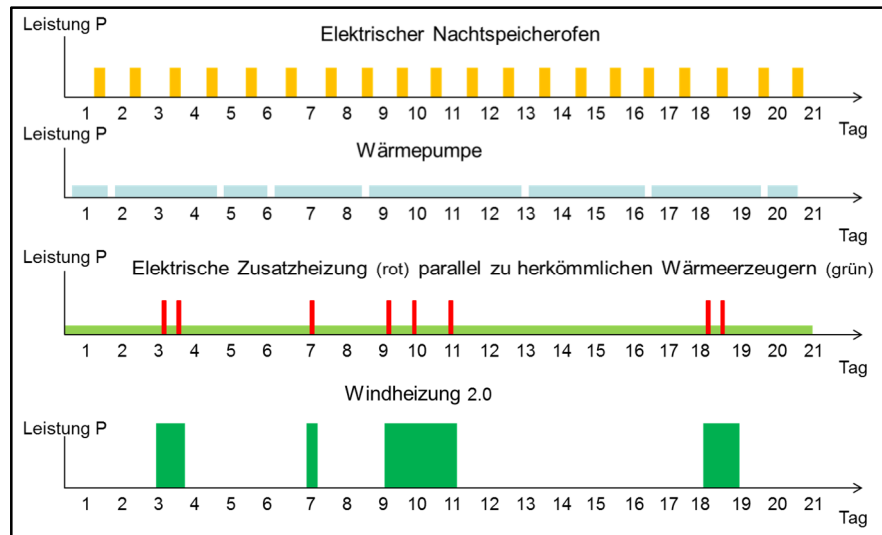


Bild 1:
Schematische Darstellung der Systemdienlichkeit eines Windheizung 2.0-Gebäudes im Vergleich zu anderen Power-to-Heat Anwendungen.

Das Windheizung 2.0-Konzept basiert darauf, in einem Versorgungsbereich die passende Anzahl von Windheizung 2.0-Gebäuden zu errichten, welche anhand der Bedürfnisse bzw. der Möglichkeiten des Energieversorgers mit Überschussstrom beladen werden. Die einzelnen Gebäude treten hierbei als variable Verbraucher auf. Die Entscheidung, welches Gebäude in welchem Umfang beladen wird, liegt weitgehend beim Energieversorger – im Zusammenspiel der Marktrollen Vertrieb und Netz, bei gleichzeitiger Sicherstellung des Nutzkomforts. Die Regelung der einzelnen Gebäude errechnet laufend eine Art „Wärme-Akkuzustand“ und übermittelt diesen an den Versorger. Dieser kann, basierend auf dieser Information, eine angebotsabhängige, gezielte Beladung derjenigen Gebäude mit dem dringendsten Bedarf vornehmen, wodurch eine zeitweise Überlastung der Netzinfrastruktur (hoher Gleichzeitigkeitsfaktor) – bzw. ein überproportional hoher Netzausbaubedarf – vermieden werden kann. Eine ggf. nötige Ertüchtigung besonders alter, gering dimensionierter lokaler Netzinfrastruktur würde darüber hinaus den forcierten Ausbau der Elektromobilität positiv beeinflussen.

Erste Ergebnisse aus den durchgeführten Voruntersuchungen ([1], [2] und [3]) zeigen, dass durch das Konzept eines Windheizung 2.0-Gebäudes eine Reduktion des nicht-erneuerbaren Primärenergiebedarfs im Bereich von 85 Prozent realisiert werden kann. Die Einsparungen beziehen sich hierbei auf ein Vergleichsgebäude gemäß GEG 2020 mit Referenztechnologie (Gasbrennwert, thermische Solaranlage, Abluftanlage) unter Bewertung der Betriebsphase und Berücksichtigung des Konstruktions-Mehraufwands für das Windheizung 2.0-Gebäude.

2 Speicherentwicklung

2.1 Entwicklung des Hochtemperatur-Steinspeicher (HTSS)

Bei dem Hochtemperatur-Steinspeicher (HTSS) handelt es sich um ein System, das die Energiemengen, die benötigt werden, um ein Windheizung 2.0-Gebäude zwischen zwei Starkwindereignissen mit Wärme zu versorgen, in einem heißen und dadurch sehr kompakten Kern aus Hochtemperaturkeramik vorhalten kann. (Weiterentwicklung basierend auf dem Grundprinzip der Elektrospeicheröfen.)

2.1.1 Entwicklung der Speicherstruktur und der Luftführung

Der HTSS hat die Aufgabe, ein Windheizung 2.0-Gebäude über einen winterlichen Überbrückungszeitraum von ein bis zwei Wochen mit Raumwärme und Trinkwarmwasser (TWW) zu versorgen. Die hierfür notwendige Wärmemenge muss innerhalb weniger Stunden über elektrische Heizstäbe in den Speicherkern eingebracht werden können. Dies erfordert die Verteilung der Beladeleistung von ca. 50 kW (für ein Ein- bzw. Zweifamilienhaus) auf eine entsprechende Anzahl von Heizstäben. Ist diese Anzahl zu gering, wird der Speicher nicht homogen und damit nicht vollständig aufgeladen, da die Wärme die Steinvolumina zwischen den Heizstäben in der zur Verfügung stehenden kurzen Zeit nicht erreicht. Eine zu hohe Anzahl von Heizstäben führt einerseits zu mehr Hohlräumen im Steinkern, wodurch dieser zur Bereitstellung der notwendigen thermischen Kapazität, vergrößert werden muss. Andererseits gibt es durch den elektrischen Anschluss jeder Heizwendel eine Durchdringung in der Speicherdämmung, so dass mehr Heizstäbe auch die Speicherverluste erhöhen.

Während die Beladung des Speichers durch die Heizstäbe erfolgt, wird die Entladung des Speicherkerns durch integrierte Luftkanäle realisiert. Auch bezüglich der Kanäle gilt, dass der optimale Abstand bzw. die Größe entscheidend für die Funktion des HTSS ist. Zu wenige Kanäle verhindern die Nutzung der Steinvolumina zwischen den Kanälen und erzeugen wegen des geringen Querschnitts hohe Druckverluste im Luftvolumenstrom. Zu viele Kanäle bedeuten einen Verlust an thermischer (Stein-) Speichermasse.

Ein weiterer zu berücksichtigender Aspekt ist die einfache Montierbarkeit des ca. 5 Tonnen schweren Speichers im Keller eines Gebäudes. Aus diesem Grund wird das maximale Gewicht der Einzelkomponenten auf 9 kg beschränkt. Entsprechend wird die gedämmte Hülle des Speichers modular aufgebaut und der Steinkern des Speichers als einzelne Steine und Mörtel geliefert. Um eine spätere Wartung zu ermöglichen kommt ein reversibler, nicht abbindender Mörtel zum Einsatz, der ein späteres Zerlegen des Speichers ermöglicht.

Der gemauerte Steinkern besteht aus dem eigentlichen thermischen Speicherkern und der darunter und darüber angeordneten Luftführung. Der thermische Kern beinhaltet sowohl die Aufnahmen für 20 Heizstäbe als auch die 32 geraden Luftkanäle. Die einzelnen Speichersteine werden aus „Suprath A40-t“

(siehe Abschnitt 2.1.3) gefertigt. Bild 2 zeigt den Aufbau eines HTSS-Speicherkerns mit einem Volumen von 1,6 m³, Bild 2 zeigt die Geometrie des gewählten Steins im Detail.

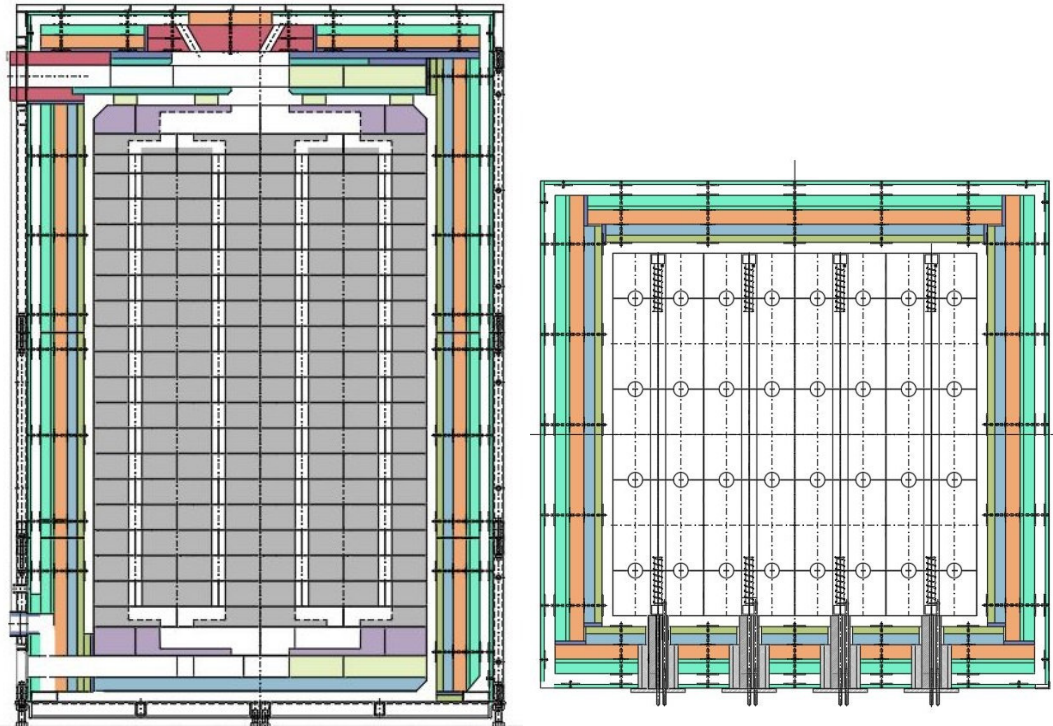


Bild 2:
 Links: Ansicht des Speichers inkl. der Lüftungskanäle.
 Rechts: Horizontalschnitt durch den Speicher auf Höhe der Lage 2 inkl. der 4 horizontalen Aufnahmen für die Elektroheizstäbe und der 32 vertikalen Luftkanäle.

Um die dem Speicherkern zugeführte Luft von dem zentralen Anschlussstutzen auf die 32 einzelnen Luftkanäle im Kern zu verteilen, wird unterhalb des thermischen Kerns eine Verteillage aus hochtemperaturbeständiger Keramik („Porath FL 24-6“) eingesetzt, die in Bild 3 dargestellt ist. Oberhalb des thermischen Kerns ist eine spiegelbildlich aufgebaute Sammellage angeordnet, um die erhitzte Luft vor dem Verlassen des Speichers wieder zu sammeln. Wie in der Systemskizze des HTSS in Bild 4 zu erkennen, wird zusätzlich zur Durchströmung des Kerns, die der aktiven Wärmeentnahme dient, auch ein Spülluftspalt außerhalb der Dämmebene durchströmt. Dieser Luftstrom dient dazu, die passiven Speicherverluste des HTSS der technischen Gebäudeausrüstung zuzuführen und somit nutzbar zu machen. Durch eine entsprechend geregelte Lüftungsklappe wird der Gesamt-Luftvolumenstrom durch den Speicher so zwischen dem Spülluftspalt und dem Kern aufgeteilt, dass sich am gemeinsamen Luftaustritt des HTSS die von der Regelung gewünschte Austrittstemperatur einstellt. Diese ist aus Sicherheitsgründen auf maximal 90 °C zu begrenzen.

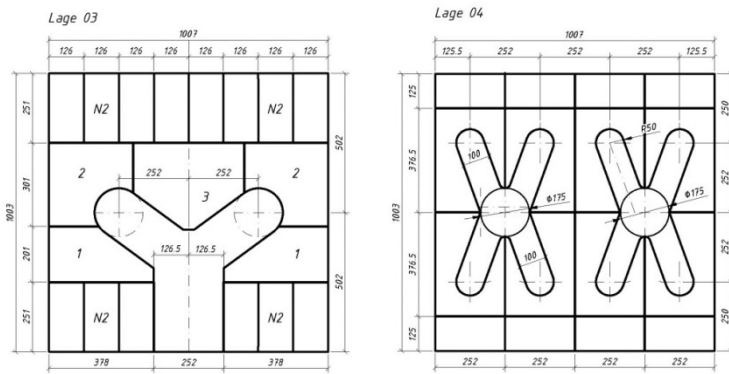


Bild 3:
Luftführung im Speicherkern, links und mittig als technische Zeichnung,
rechts als Fotografie.

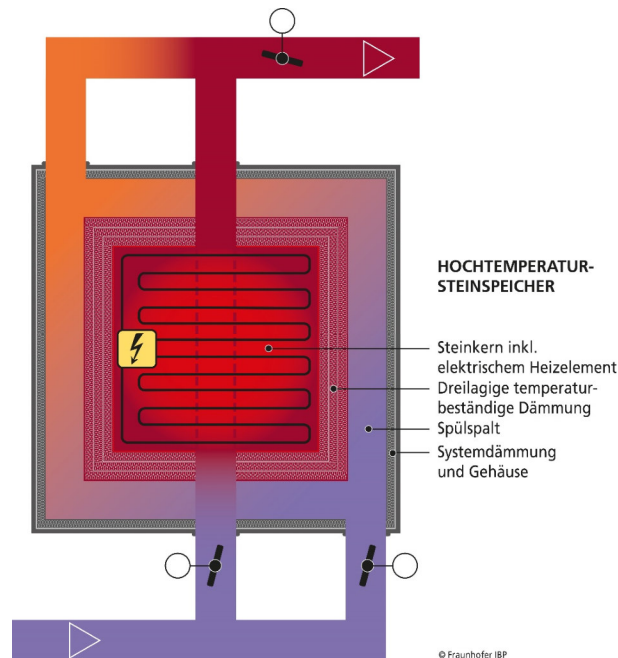


Bild 4:
Systemskizze des HTSS inklusive Luftführung.

Ursprünglich war die Realisierung der aktiven Entladung über die Durchströmung des Speicherkerns durch 24 vertikale Luftkanäle vorgesehen. Jedoch erhöht die hohe Anzahl an Kanälen und der entsprechenden Luftverteilung oben und unten am Speicherkern die Herstellungskosten. Gleichzeitig steht das entsprechende Volumen nicht mehr zur Wärmespeicherung zur Verfügung, was die Kapazität des Speichers reduziert. Im Rahmen der Versuche wird daher geprüft, ob es alternativ möglich ist den Luftstrom ausschließlich zwischen Kern-Oberfläche und der Innenseite der Dämmung hindurch zu führen, anstatt den Kern über Luftkanäle aktiv zu entladen. Bei dieser Lösung ist allerdings fraglich,

ob die Wärme schnell genug aus dem Inneren des Kerns bis nach außen geleitet werden kann. Aus diesem Grund wurde der Prüfling für die Evaluierung im Zwillingshaus im Winter 2020/21 mit beiden Varianten der aktiven Entladung ausgestattet (siehe Bild 5).

Während der Evaluierung werden beide Varianten hintereinander messtechnisch untersucht. Anschließend wird ausgewertet, bei welchem Temperaturniveau im HTSS welche Heißlufttemperaturen und Leistungen entnommen werden können. Basierend hierauf wird festgelegt, ob die technisch aufwendigeren Luftkanäle oder der einfachere Entladungs-Luftspalt für die spätere Produktumsetzung gewählt werden.

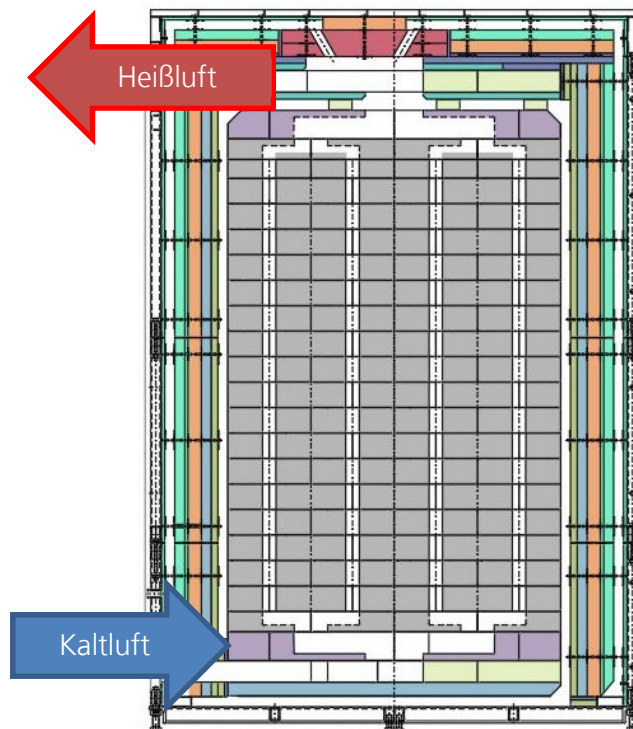


Bild 5:
Technische Zeichnung des HTSS mit beiden Varianten der Luftführung zur aktiven Entladung des Speicherkerns (umlaufender Luftspalt und 24 Luftkanäle).

2.1.2 Festlegung zum Aufbau der Dämmung

Wie in Kapitel 2.1.1 erläutert, werden die Speicherverluste durch die Durchströmung des Spülspalts dem Gebäude zugeführt, damit diese Wärmemenge nicht ungenutzt bleibt. Hieraus folgt, dass zur Vermeidung starker Überwärmung im Gebäude die Dämmung des HTSS so dimensioniert werden muss, dass die resultierenden Speicherverluste dem durchschnittlichen Wärmebedarf des Gebäudes während einer kalten Winterperiode entsprechen. Diese Auslegung muss für den Fall eines voll beladenen HTSS (ohne aktive Entladung) erfolgen, da in diesem Zustand die höchsten passiven Wärmeströme entstehen. Da der HTSS nur in entsprechend kalten Winterperioden komplett aufgeladen wird, ist die hierfür maßgebliche Heizlast der mittlere Bedarf über mehrere sehr kalte Wintertage. Im Rahmen der Voruntersuchungen in der Projektphase 2015/16 wurde dargelegt, dass für den Fall der Zwillingshäuser auf dem Versuchsgelände des Fraunhofer IBP, die für typische deutsche Einfamilienhäuser repräsentativ sind, diese mittlere Heizlast für ein Gebäude mit entsprechender energetischer Qualität bei ca. 2,4 kW liegt. Auch müssen im Stillstandsfall, also ohne Spülluft, die auftretenden Oberflächentemperaturen am HTSS auf unter 60 °C begrenzt bleiben. Die entsprechende Auslegung der Speicherdämmung ist in Bild 6 dargestellt.

Bei der Auslegung muss berücksichtigt werden, dass alle Dämmmaterialien bei steigenden Materialtemperaturen eine zunehmende Wärmeleitfähigkeit aufweisen. Aus diesem Grund ist die Verwendung von im Baugewerbe üblichen Dämmstoffen für den HTSS nicht möglich. Es müssen spezielle Hochtemperatur-Dämmstoffe verwendet werden. Auf Grund der hohen Kosten für derartige Dämmstoffe kommt, wie in Bild 2 zu erkennen ist, ein mehrschichtiger Aufbau zum Einsatz, bei dem die leistungsfähigeren, teureren Dämmstoffe in den heißeren Schichten nahe am Kern eingesetzt werden, während in den äußeren, bereits kühleren Dämmschichten günstigere Werkstoffe verwendet werden.

Stationäre Wärmedurchgangsrechnung durch ebene Wand

| | |
|----------------|---|
| Kunde | Fraunhofer |
| Anlage | Windheizung 2.0 Wärmedämmung Speicherkern |
| Detail | "worst case" 125mm Dämmung + 30mm ruhende Luft |
| Zeichen | 3.4.19 / Licht |

| | | | |
|-----------------------------------|--------------|---------------|----------------|
| | Innen | Aussen | Einheit |
| Umgebungstemperatur (Eingabe) | 800 | 20 | °C |
| Oberflächentemperatur (berechnet) | 799.3 | 43.7 | °C |
| Wärmeübergangskoeffizient | 300 | 8 | W/m2K |
| Berechnungsformel | | VDI_2055 | |
| Windgeschwindigkeit | | 0.0 | m/s |
| Emissionskoeffizient | | 0.500 | |
| Durchgehende Wärme | 196 | 196 | W/m2 |

| Wandschichten von innen nach außen | | | Temperatur | |
|------------------------------------|-----|-------|------------|-------|
| Material | mm | W/mK | mittel | grenz |
| Calsitra Mat 1250/128 | 15 | 0.227 | 793 | 799.3 |
| Microcal 1100 | 30 | 0.112 | 760 | 786.4 |
| MIKRO-POROES 300 KG | 40 | 0.029 | 607 | 733.7 |
| KV 500 | 40 | 0.040 | 370 | 465.9 |
| STAHL | 2 | 47.60 | 266 | 266.1 |
| LUFT | 30 | 0.038 | 192 | 266.1 |
| STAHL | 1 | 52.55 | 111 | 111.4 |
| KV 500 | 10 | 0.029 | 78 | 111.4 |
| STAHL | 1 | 54.14 | 44 | 43.7 |
| | 169 | | | 43.7 |

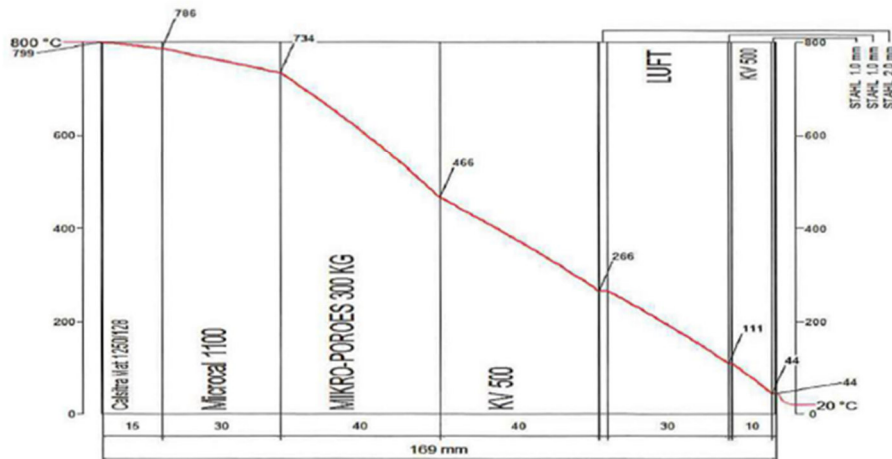


Bild 6:
Berechneter Temperaturverlauf durch den Querschnitt der Speicherwandung bei voller Speicherladung und ohne Durchströmung der Spülspalts.

2.1.3 Auswahl des Steinmaterials

Die Auswahl des Steinmaterials erfolgt nach wirtschaftlichen und technischen Kriterien. Das Optimum hinsichtlich Kosten und Wärmespeichervermögen stellen Schamotte dar. Für den konkreten Anwendungsfall ist der Einsatz der Qualität A40t vorgesehen, da diese die höchste Dichte der verfügbaren Schamottequalitäten aufweist.

2.1.4 Auswahl der Heizstäbe

Die Heizstäbe wandeln die zur Verfügung gestellte elektrische Energie in Wärme um und geben diese an den Speicherkern ab. Bei der Auswahl der Heizelemente spielen mehrere Kriterien eine Rolle, auf die im Folgenden kurz eingegangen wird.

Angestrebt ist eine Kerntemperatur im Speicherkern von bis zu ca. 800 °C. Die Heizelemente müssen für einen ausreichenden Wärmeübergang vom Heizelement zum Speicherkern eine Übertemperatur von mindestens 150-200 Kelvin oder mehr erreichen. Außerdem müssen sie sowohl im ein- als auch im ausgeschalteten Zustand gegenüber diesen Temperaturen beständig sein. Prinzipiell sind dafür Heizelemente aus Widerstandsdraht oder Heizelemente aus Siliziumkarbid oder Molybdän-Disilizid geeignet. Jedoch haben von den vorgenannten Heizelementen nur die Heizwendeln aus Widerstandsdraht einen akzeptablen Laständerungsgradienten. Andere Heizelemente benötigen zum Teil stundenlange Aufheizzeiten und haben Laständerungsgradienten von 300 K/h oder länger. Dies ist für die Abnahme und Nutzung der meist nur kurzfristig und kurzzeitig zur Verfügung stehenden Überschuss-Energiemengen nicht geeignet.

In Bezug auf die dauerhafte Beständigkeit der Heizelemente (Heizwendeln) hat sich der Einsatz dieser Heizwendeln in oxidierender Atmosphäre, wie z.B. Luft, bewährt. Zwar wirkt Luft wärmetechnisch als Isolator und erschwert damit den Wärmeübergang vom Heizelement zum Speicherkern, allerdings bilden Heizwendeln in oxidierender Atmosphäre eine Art Schutzschicht, die sie vor weiterer Korrosion schützt. Außerdem wirkt die Luft auch elektrisch als Isolator, was für die Betriebssicherheit ein entscheidender Faktor ist. Der Einsatz von Füllstoffen wie z.B. Magnesiumoxid, wie sie in elektrischen Heizelementen verwendet werden, sind für den Wärmeübergang sehr hilfreich, da diese Wärme sehr gut leiten. Jedoch sind diese Füllstoffe stark hygroskopisch, was gerade an den bevorzugten Aufstellorten wie dem Keller (oder ggf. dem Bad), die tendenziell eine höhere Luftfeuchtigkeit aufweisen, aufwändige Schutzmaßnahmen gegen das Eindringen von Luftfeuchte erfordern würde.

Ein weiteres wichtiges Kriterium ist der zur Verfügung stehende Bauraum, in dem die Heizleiter mit der angestrebten Gesamtleistung von 30 bis 50 kW eingebracht werden. Je weniger Volumen die Heizelemente einnehmen, umso mehr Volumen steht bei den definierten Außenabmessungen des HTSS für den eigentlichen Speicherkern zur Verfügung. Es sind also kompakte Heizstäbe mit sehr hoher Leistungsdichte erforderlich. Konträr dazu ist für einen möglichst guten Wärmestrom vom Heizelement zum Speichermaterial eher eine große Oberfläche erforderlich. Insofern erfolgte beim Design des Speicherkerns, gemeinsam mit der Fa. Rath, eine entsprechende Optimierung der Kanäle für die Heizelemente in Bezug auf Anordnung, Größe und Anzahl (siehe auch Abschnitt 2.1.1).

Von den zur Verfügung stehenden 20 Kanälen werden lediglich die 16 unteren Kanäle und 2 aus der obersten Reihe bestückt. Somit ergibt sich mit 18 Heizwendeln eine durch 3 teilbare Anzahl von Heizstäben, die eine elektrisch gleichmäßige Beschaltung ermöglicht, um eine symmetrische Belastung der 3 Phasen am Hausanschluss zu realisieren.

Für den tatsächlich zu erwartenden Wärmeübergang vom Heizelement zum Speicherkern gibt es keine exakten Berechnungsverfahren. Die in Abschnitt 2.1.6 beschriebenen Simulationen, zusammen mit dem Kleinversuch, konnten entscheidende Daten und Erkenntnisse für die weitere Optimierung der Heizwendelgeometrie sowie der Parameter für den Aufheizvorgang liefern. Hinsichtlich der Geometrie der Heizwendeln geht es bei der weiteren Optimierung nicht nur um Drahtstärke, Wendeldurchmesser, Steigung und Legierung, sondern auch um die Optimierung der Montierbarkeit und elektrischen Ansteuerung. Die Heizelemente werden von einer Seite in den Speicherkern eingebracht und elektrisch angeschlossen (geringerer Wärmeverlust, flexiblere Aufstellmöglichkeiten des Speichers, reduzierte Wartungs- und Reparaturkosten).

Für den Versuch werden die Heizstäbe schonend mittels Thyristorsteuerung und An- und Abfahrrampen mit Leistung beaufschlagt. Für das Serienprodukt wird aus Kostengründen der Einsatz von einfachen Schaltschützen angestrebt, allerdings müssen dazu die optimierten Heizwendeln die resultierenden Einschaltströme bewältigen.

Um die einseitige Kontaktierung der Heizstäbe am Speichergehäuse zu ermöglichen, muss der Rückleiter entweder außerhalb oder innerhalb der Wicklung der Heizwendel wieder nach vorne zurückgeführt werden. Aus fertigungstechnischen Gründen wird eine Variante mit innenliegendem Rückleiter gewählt. Als Tragelement und zur elektrischen Isolation zwischen Leiter und Wendel wird die Wendel um ein glattes Keramikrohr gewickelt (siehe Bild 7). Damit die Heizwendel nicht auf dem Boden der Nut in den Speichersteinen aufliegt werden, wie in Bild 8 erkennbar, am vorderen und am hinteren Ende Keramik-Rohrhülsen als Abstandshalter angebracht.



Bild 7:
Heizwendeln mit Keramikhülsen als Abstandshalter.

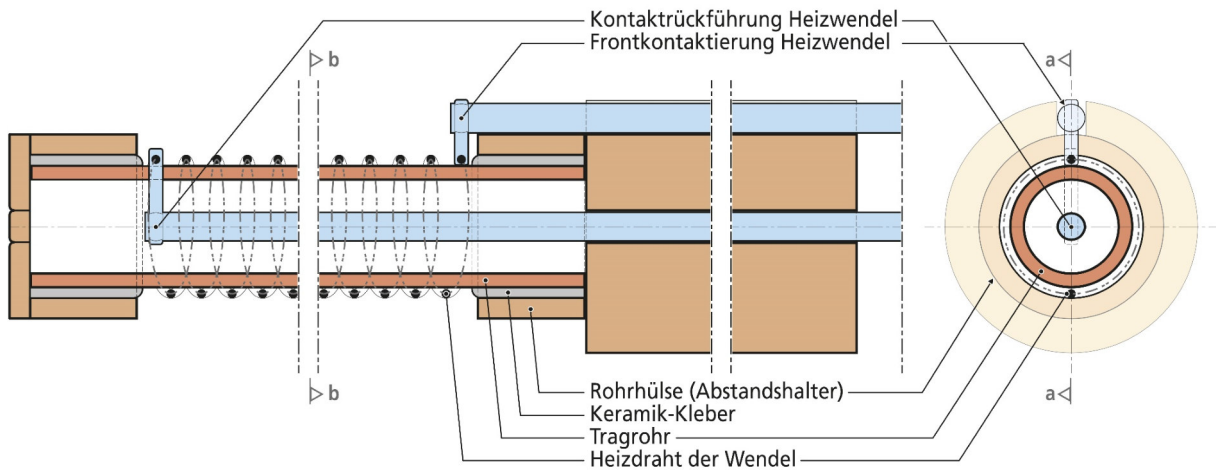


Bild 8:
Schematischer Aufbau der Heizwendeln inkl. Tragrohr und Hülse als Abstandshalter.

2.1.5 Einbindung des Speichers in die technische Gebäudeausrüstung

Bei der Einbindung des HTSS in die technische Gebäudeausrüstung des mit Raumwärme und Trinkwarmwasser (TWW) zu versorgenden Gebäudes müssen neben der thermischen Kapazität des HTSS noch einige weitere Aspekte berücksichtigt werden. Die Temperatur am Austritt des HTSS kann durch die Aufteilung des Luftstroms zwischen dem Spülspalt und der aktiven Entladung durch den Speicherkern geregelt werden. Einerseits soll die Entladetemperatur am Speicheraustritt 90 °C nicht überschreiten, um für die TWW-Bereitung einen gewöhnlichen Warmwasser-Wärmetauscher ohne spezielle Wärmeträgerflüssigkeiten oder hohe Drücke verwenden zu können. Andererseits müssen zur Übertragung der notwendigen Wärmeleistungen bestimmte Mindesttemperaturen zur Verfügung gestellt werden. Für die TWW-Bereitung wird die HTSS-Auslasstemperatur auf 85 °C festgelegt. Die Temperaturen im Luft-Wärmetauscher (Raumzuluft) zur Gebäudebeheizung sollten 52 °C nicht überschreiten, um die Verschmelzung von Staubpartikel zu verhindern. Nach den beiden Wärmetauschern soll die Temperatur der Entladeluft möglichst weit abgekühlt sein (unter 35 °C), damit der Luftstrom im Spülspalt des HTSS nicht zu warm ist, was erhöhte Speicherverluste in den Aufstellraum verursachen würde. Bild 9 zeigt die Skizze eines entsprechenden Systemaufbaus. Der Warmwasserwärmetauscher belädt einen (Schichten-)Speicher aus dem einerseits, unter Verwendung eines Frischwassermoduls, Trinkwarmwasser bereitet werden kann, andererseits kann ebenfalls Heizungswarmwasser zur zusätzlichen Beheizung einzelner, besonders wärmebedürftiger Räume, wie z.B. Bäder, entnommen werden. Die Anzahl der Räume, in denen ein hydraulisches Wärmeübergabesystem installiert wird, sollte aus ökonomischen Gründen (Investitionssumme) geringgehalten werden. Damit das Gebäude weitestgehend mit einer Zuluftbeheizung beheizt werden kann, ist eine entsprechende energetische Qualität der Gebäudehülle und eine hohe Wärmerückgewinnung der Wohnraumlüftung erforderlich.

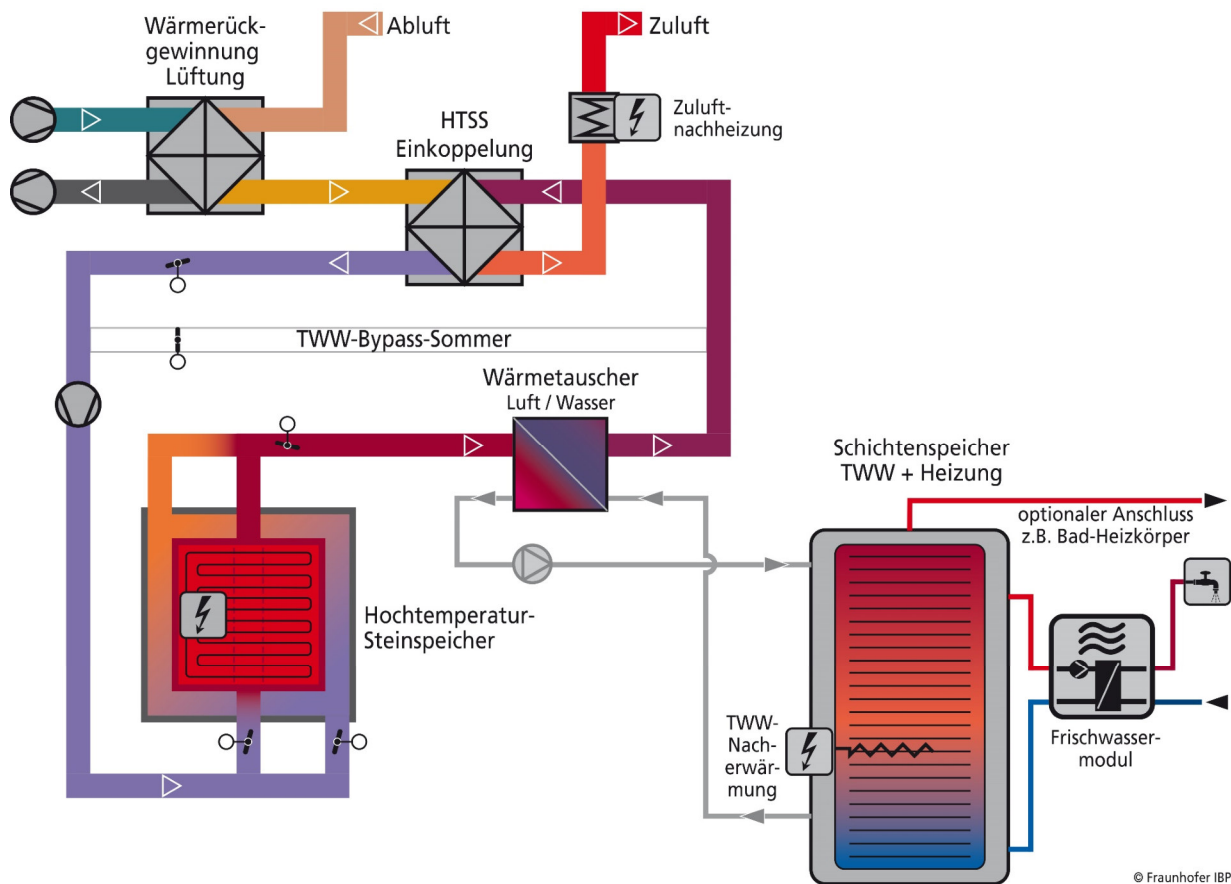


Bild 9:
 Skizze der Einbindung eines Hochtemperatur-Steinspeichers in die technische Gebäudeausrüstung zur Versorgung eines Windheizung 2.0-Gebäudes mit Raumwärme und Trinkwarmwasser. Es ist der Betriebszustand mit gleichzeitiger Warmwasserbereitung und Zulufterwärmung (Raumwärme) dargestellt.

2.1.6 Simulation des HTSS in Realgröße

Die Simulation des HTSS in Realgröße dient dazu, sicher zu stellen, dass die gewählte Heizwendel-Anzahl und -Geometrie den Speicher in der voraussichtlich netzseitig verfügbaren Ladezeit beladen kann. Die Auslegung sieht eine Temperatur des Speicherkerns von bis zu 800 °C vor, die innerhalb von 9 h erreicht werden soll (typische Dauer eines Starkwindereignisses). Zur Begrenzung der erforderlichen Simulationszeiten wird nicht der gesamte Speicher berechnet sondern, wie in Bild 10 und Bild 11 dargestellt, eine ¼-Scheibe über die gesamte Speicherhöhe. Das Modell dieser Speicherscheibe weist auf der einen Seite den geplanten Aufbau der Dämmung auf, während die andere Seite adiabat ausgebildet ist (kein Wärmestrom durch die Grenzfläche zum restlichen Speicher), um die anschließende, nächste ¼-Scheibe mit identischer Kerntemperatur abzubilden. In Bild 11 kann man erkennen, dass bei einer Heizwendeltemperatur von 1000 °C die erforderlichen Kerntemperaturen, im Kern (adiabat) und nahezu auch an der Grenzschicht zur (Außen-)Dämmung, nach 8 h erreicht werden. Dies bedeutet im Umkehrschluss, dass die angestrebte Heizwendeltemperatur nicht unterhalb von 1000 °C liegen sollte. Auch muss die

Anfahrtsrampe der Solltemperatur möglichst steil gewählt werden, um v.a. bei kürzeren Beladezeiten möglichst lange eine hohe Wendeltemperatur bereit zu stellen. Wendeltemperaturen deutlich oberhalb von 1200 °C sollten aus Dauerfestigkeitsgründen vermieden werden. Um eine akkurate Simulation sicher zu stellen, werden die getroffenen Modellansätze, wie in Abschnitt 2.4.1 beschrieben, an Hand der Messdaten aus dem Klein- bzw. Vorversuch im Rahmen des Arbeitspakets 4 validiert.

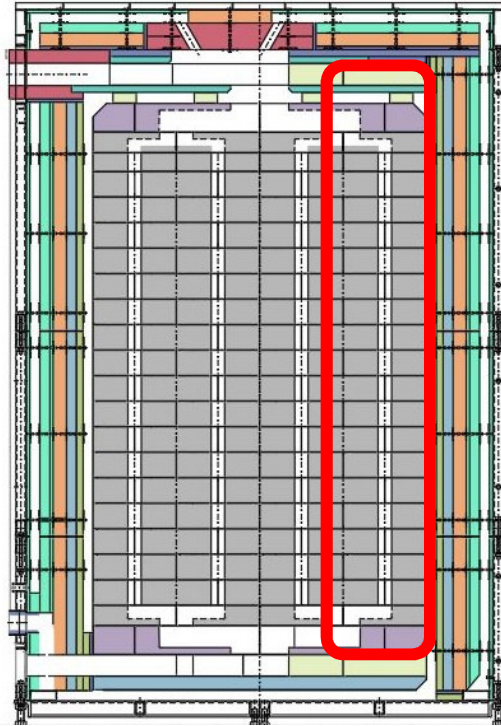


Bild 10:
Rot markiert das gewählte Element (1/4-Scheibe) im Schnitt.

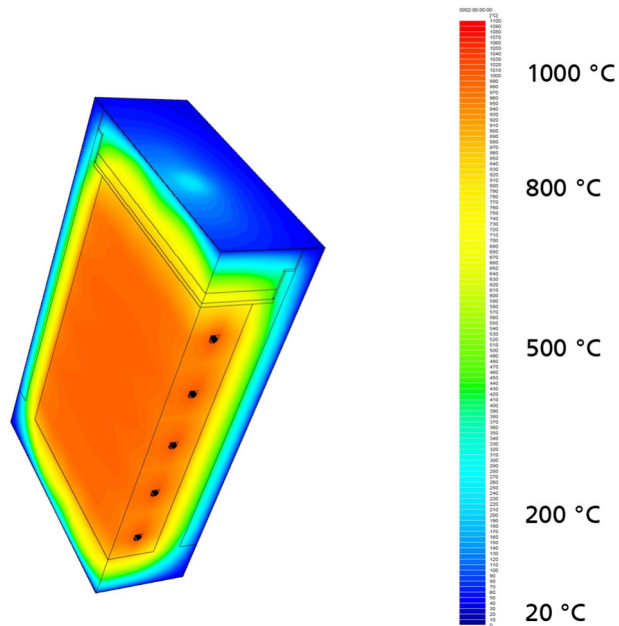


Bild 11:
Falschfarben-Darstellung der Wärmeverteilung in der simulierten ¼-Scheibe des HTSS im voll beladenen Zustand nach 48 h Beladung.

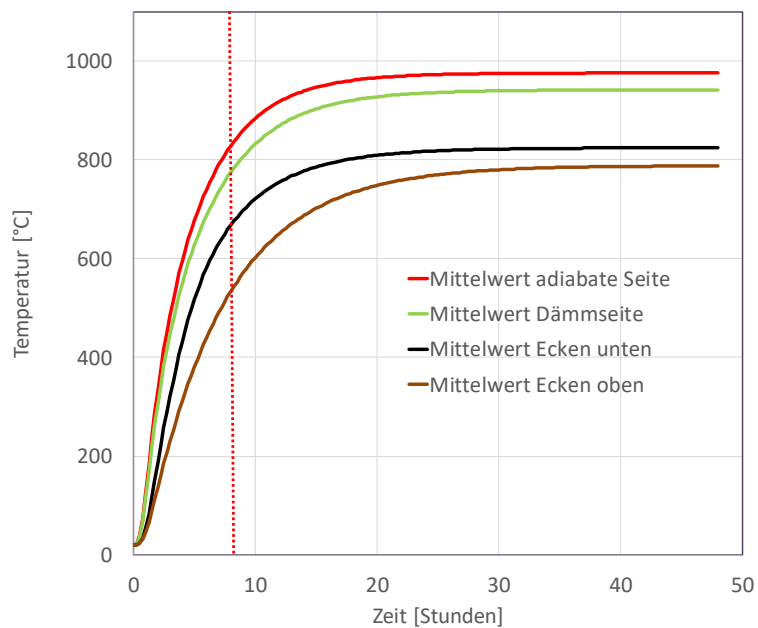


Bild 12:
Simulierter Temperaturverlauf in der ¼Scheibe des HTSS während der Beladung mit einer Heizwendeltemperatur von 1000 °C (Simulation ohne Anfahrtsrampe).

2.1.7 HTSS-System Simulationsmodell

Das am Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP Holzkirchen entwickelte Programm WUFI® Plus [4], wurde erweitert, um ein Gebäude mit HTSS-System zu berechnen, bzw. zu simulieren. Dabei wird das Modell zur dynamischen Wärmebrückensimulation [5] verwendet, mit dem das thermische Verhalten von Gebäudebauteilen zwei- oder dreidimensional berechnet werden kann. Das Modell wendet die Finite-Volumen-Methode von Eymard [6] an. Diese in WUFI® Plus implementierte Methode ist unter anderen nach DIN EN ISO 10211 [7] validiert. Basierend auf dem thermodynamischen Gesetz der Energieerhaltung und der physikalischen Interpretation des Wärmestroms und der Wärmespeicherung ist das Modell für die Simulation von Gebäudebauteilen, über den üblichen Anwendungsfall von Wärmebrücken hinaus geeignet. Das dreidimensional definierte Bauteil wird in kleine Volumen aufgeteilt. Mittels der numerischen Lösung von Integralen werden die Wärmeströme über die Volumen-Begrenzungsflächen sowie die Temperatur und Enthalpie innerhalb der Volumen bestimmt. An den Bauteiloberflächen können Außen- oder Innenraumklimata angesetzt werden. Die gegenseitige Wechselwirkung und der Wärmeaustausch zwischen Bauteil und Innenraum werden in jedem Zeitschritt berücksichtigt.

Der HTSS wird als solches 3D-Bauteil der Gebäudesimulation hinzugefügt. Zur Reduzierung der Simulationsdauer wird vereinfacht nur ein vertikales Viertel des HTSS, modelliert (Bild 13), was auf Grund der Symmetrie des Systems möglich ist. Über definierte Umschließungsflächen des 3D-Bauteils tauscht der so modellierte Speicher Wärme mit einer definierten Zone des Gebäudemodells aus. Passive Wärmeverluste werden somit abgebildet. Der aktive Teil des HTSS-Systems wird über ein erstelltes Plug-In berechnet und mit dem 3D-Bauteil gekoppelt. Das Plug-In enthält Berechnungs-Teilmodelle der elektrischen Heizelemente, Lüftungskanäle, Luft-Wasser Wärmetauscher zur Trinkwarmwassererzeugung, Luft-Luft-Wärmetauscher zur Raum-Heizung, Rohr-Verteiler und Ventile zur Luftstrom-Regelung sowie Regelungstechnik. Die genannten einzelnen Teilmodelle wurden der dynamischen Anlagentechnik-Simulation von WUFI® Plus [8] entnommen und zu dem HTSS-System entsprechen neu im Plug-In zusammengesetzt um das in Bild 9 skizzierte System abzubilden.

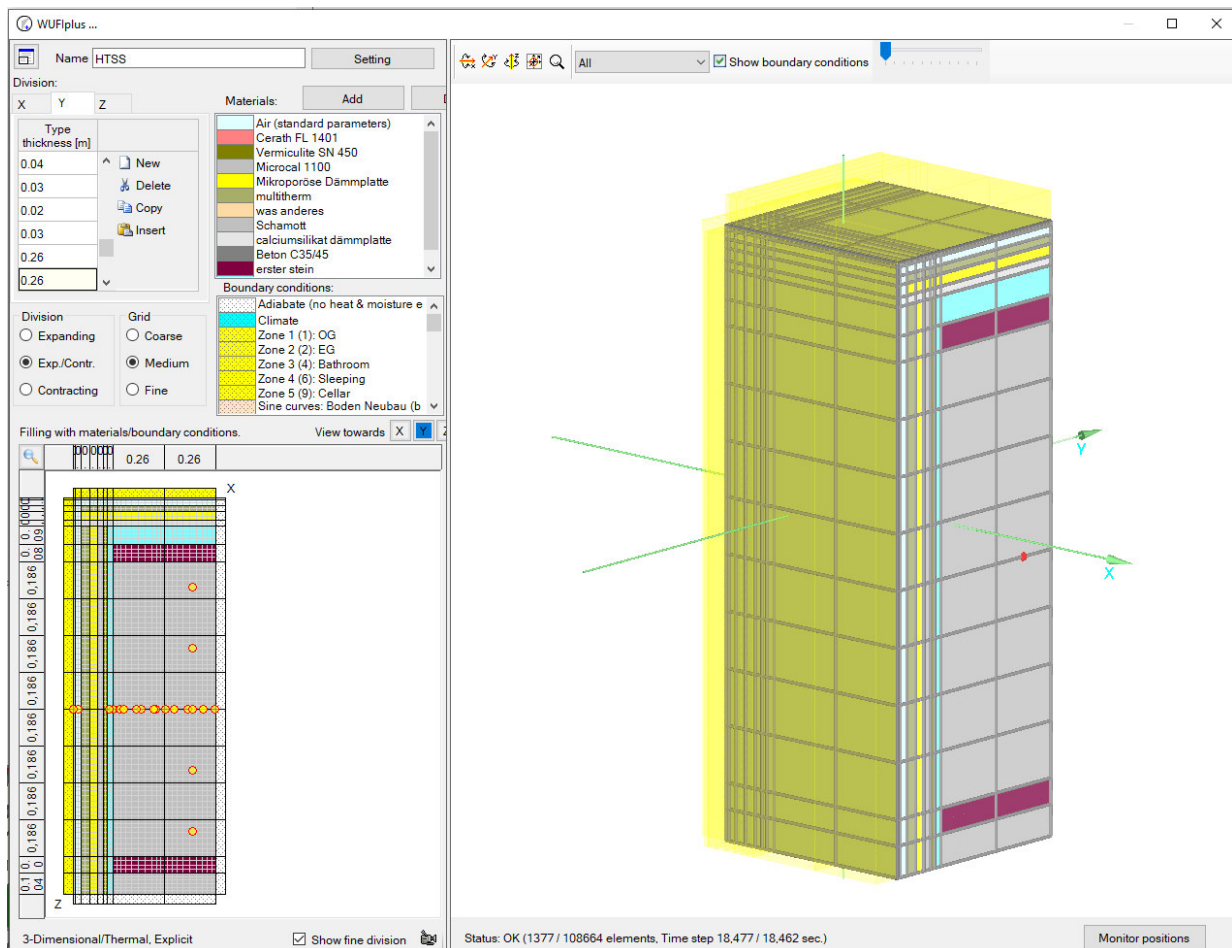


Bild 13:
Bildschirmfoto des Simulationsmodells (3D-Objekt) des HTSS in der Gebäudesimulationssoftware WUFI Plus.

Teilmodell Lüftungskanal

Das Teilmodell zur Abbildung der Lüftungskanäle innerhalb des HTSS ist das in [8] beschriebene TABS (Thermo-Aktives-Bauteil-System) – Modell. Es berechnet den abgegebenen bzw. aufgenommenen Wärmestrom über die Wärmeleitung durch ein Rohr, in diesem Fall eines Lüftungskanals, je nach den Temperaturverhältnissen zwischen fließendem Medium und Umgebung. Das Rohr selbst wird ebenfalls der Länge nach in Teilstücke zur Abbildung des fließenden Mediums diskretisiert. Die Umgebung ist in diesem Fall das dreidimensionale HTSS-Modell, beziehungsweise dessen Luftkanal berührende Finite-Volumen. Die Verortung des Luftkanals im HTSS-Modell erfolgt über dessen kartesisches Koordinatensystem. Ein Luftkanal ist mit x-, y- und z-Anfangskoordinate sowie Kanal-länge und -richtung definiert. Das Teilmodell zur Abbildung eines Lüftungskanals erhält die Umgebungstemperaturen des HTSS-Modells und berechnet mit der Temperatur und dem Massenstrom des einfließenden Mediums die Temperatur des fließenden Mediums am Kanalende sowie den Wärmestrom zwischen Lüftungskanal und dessen Umgebung, bzw. finiten Volumens des HTSS.

Teilmodell Heizelemente

Das Modell der elektrischen Heizelemente wird unabhängig von den durchströmten Bauteilen berechnet, jedoch wie das TABS-, bzw. Luftkanal-Modell mit dem HTSS gekoppelt. Anfangsposition, Länge und Richtung im Koordinatensystem werden ebenso definiert. Die maximal mögliche elektrische Leistung wird als Eingabeparameter übergeben. Das Abfallen der Wärmeleistung bei steigender Temperatur ist teilweise regelungsbedingt, da die Heizwendeln in drei Regelungsgruppen zusammen geschaltet sind. Die Leistung der gesamten Wendelgruppe wird reduziert, wenn an einer Stelle die Maximaltemperatur erreicht wird. Dieser Einfluss wird durch die empirisch abgeleitete Formel (1) abgebildet, die aus den in Kapitel 2.5.1 beschriebenen Messungen am HTSS abgeleitet wurde.

$$\dot{Q}_{Quelle} = \dot{Q}_{max} * (1 - 0,04 * \left(\frac{\vartheta_{Bauteil} - \vartheta_{Starttemperatur}}{100}\right)^2) \quad (1)$$

Teilmodell Wärmetauscher

Zur Berechnung des Luft-Wasser-Wärmetauschers ist der Wärmbedarf zur Trinkwarmwasserbereitung \dot{Q}_{TWW} bekannt oder wird mit der Warmwasser-Zapfmenge $\dot{m}_{k,Zapfprofil}$, der Zapf-Solltemperatur ϑ_{Soll} und Eintrittstemperatur $\vartheta_{k,E}$ des Kaltwasser-Zulaufs nach Formel (2), berechnet. Die maximal zur Verfügung stehende Wärmemenge ergibt sich aus dem Massenstrom im Lüftungskanal $\dot{m}_{w,Luftkanal}$, dessen Eintrittstemperatur $\vartheta_{w,E}$ aus dem HTSS Heißluftkreis am Wärmetauscher und der Zapf-Solltemperatur ϑ_{Soll} , Formel (3).

$$\dot{Q}_{TWW} = \dot{m}_{k,Zapfprofil} * cp_{Wasser} * (\vartheta_{Soll} - \vartheta_{k,E}) \quad (2)$$

$$\dot{Q}_{max} = \dot{m}_{w,Luftkanal} * cp_{Luft} * (\vartheta_{w,E} - \vartheta_{Soll}) \quad (3)$$

Wird kein idealer Wärmetauscher angenommen, kann der Bedarf um den Wirkungsgrad des Wärmetauschers erhöht werden. Ist dann die zur Verfügung stehende Wärmemenge größer als der Wärmebedarf zur TWW-Bereitung, wird der Bedarf entnommen und die resultierende Lufttemperatur am Austritt des Wärmetauschers mit Formel (4) ermittelt.

$$\vartheta_{w,A} = \vartheta_{w,E} - \frac{\dot{Q}_{TWW} / \eta_{Wärmetauscher}}{\dot{m}_{w,Luftkanal} * cp_{Luft}} \quad (4)$$

Wenn die verfügbare Wärmemenge im HTSS-System nicht ausreichend ist, wird die maximal mögliche Wärmemenge dem System entnommen und der Rest-Energiebedarf ausgegeben.

Das allgemeine Modell eines Wärmetauschers wird zur Berechnung des Luft-Luft-Wärmetauschers zur Gebäudebeheizung verwendet. Der ideale Wärmetauscher wird bestimmt durch zwei Strömungen, definiert durch deren Massenstrom und der spezifischen Kapazität des strömenden Mediums. Nach Gleichung (5) lässt sich die maximal übertragbare Wärmemenge \dot{Q}_{max} berechnet

unter Verwendung der Massenströme \dot{m}_w , \dot{m}_k und den beiden Eintritts-Temperaturen, an der warmen Seite des HTSS Heißluftkreises $\vartheta_{w,E}$ und an der kalten Seite des Lüftungssystems des Gebäudes $\vartheta_{k,E}$. Diese maximal übertragbare Wärmemenge wird wiederum durch den Wirkungsgrad des Wärmetauschers $\eta_{\text{Wärmetauscher}}$ reduziert.

$$\dot{Q}_{\max} = \left(\min(\dot{m}_w * cp_w; \dot{m}_k * cp_k) * (\vartheta_{w,E} - \vartheta_{k,E}) \right) * \eta_{\text{Wärmetauscher}} \quad (5)$$

Daneben ist vom Gebäudemodell die notwendige Wärmemenge zu jedem Zeitschritt bekannt, um die Soll-Raumtemperatur zu halten. Ist die maximal zu Verfügung stehende Wärmemenge größer als der Bedarf vom Gebäude \dot{Q}_{Heizung} , ist die Raumheizung aus dem Speicher möglich. Die Austrittstemperaturen am Wärmetauscher werden für diesen Fall nach Formel (6) ermittelt. Ist die verfügbare Wärmemenge kleiner, oder die Austrittstemperatur zum Gebäude $\vartheta_{k,A}$ kleiner als die Soll-Raumtemperatur ϑ_{Soll} muss auf Soll-Raumtemperatur nachgeheizt werden. Die fehlende Wärmemenge entspricht dabei einem Reststrombedarf zum Nachheizen.

$$\dot{Q}_{\max} > \dot{Q}_{\text{Heizung}}: \vartheta_{w,A} = \vartheta_{w,E} - \frac{\dot{Q}_{\max}}{\dot{m}_w * cp_w}; \vartheta_{k,A} = \vartheta_{k,E} + \frac{\dot{Q}_{\max}}{\dot{m}_k * cp_{wk}} \quad (6)$$

Teilmodell Verteiler und Sammler, Ventile, Lüfter

Der Luftstrom wird beim Eintritt in den HTSS auf mehrere Luftkanäle verteilt und beim Austritt wieder vereint, bzw. gesammelt. Beim Verteiler ist die Austrittstemperatur an jedem Ausgang gleich der Eintrittstemperatur. Der Eintrittsmassenstrom wird auf die Ausgänge verteilt, sofern diese im folgenden Strangverlauf geöffnet sind. Der Massenstrom am Ausgang des Sammlers ist die Summe aus allen seinen Eingängen. Die Austrittstemperatur am Sammler wird über die Eintrittstemperaturen aller Sammler-Eingänge ermittelt und über deren Massenströme entsprechend gewichtet. Das Modell für ein Ventil kann je nach Zustand den Massenstrom für einen Strang auf 0 setzen, oder über einen Faktor verringern. Das Modell des Lüfters setzt je nach Zustand den Massenstrom.

Berechnungsalgorithmus

Zur Reduzierung der Berechnungsdauer und zur flexiblen Verknüpfung sämtlicher Teilmodelle wurde die Simulationsmethodik der Anlagentechnik [8] weiterentwickelt. So wird mit dem entwickelten Plug-In nicht das Gesamtmodell der Anlagentechnik erstellt und ein somit erzeugtes Gleichungssystem iterativ gelöst, sondern es werden die einzelne Teilmodelle in einem Wasserfallprinzip gekoppelt und explizit mit kleinen Zeitschritten, voreingestellt jede Sekunde, berechnet. Iterativ bedeutet hier, dass ein berechneter Zeitschritt mit einer üblichen Dauer von einer Stunde so lange neu berechnet wird, bis das System konvergiert. Hierfür werden hauptsächlich die Temperaturen im System, bzw. den Teilmodellen variiert bis die Wärmebilanzen ausgeglichen sind. Mit der entwickelten expliziten Methode wird, angelehnt an das reale Rohr-Leitungsnetz von hydraulischen oder luftführenden Systemen, jedes Teilmodell in deren Reihenfolge berechnet. Jedes Teilmodell hat Eingangs- und Ausgangsanschlüsse mit der Information über Temperatur und Massenstrom des fließenden Mediums.

Zu Beginn eines Zeitschrittes werden Randbedingungen wie Raumtemperaturen des Gebäudemodells oder Umgebungtemperaturen des Luftkanals von HTSS Bauteil und das Anlagenmodell übergeben. Daraufhin startet ein Teilmodell die Berechnung mit Initialisierungswerten oder dem Eingangswert des Zeitschritts zuvor und berechnet die Änderung des fließenden Mediums an dessen Ausgang, welcher wieder an den Eingang eines nachfolgenden Teilmodells gekoppelt ist. Das nachfolgende Teilmodell wird berechnet und danach dessen folgende Modelle. Ist das letzte Teilelement berechnet, ist der Zeitschritt abgeschlossen und die ermittelten Werte, hauptsächlich die Wärmeströme, werden dem dreidimensionalen HTSS-Modell und dem Gebäudemodell zurückgegeben.

HTSS – Modellvalidierung

Das Modell zur Abbildung des HTSS-Gesamtsystems wurde mit Messdaten des HTSS der Freilandversuche (Abschnitt 2.5) verglichen. Gezeigt wird hier eine Messreihe in etwa der Mitte des HTSS, vom Steinrand nach innen, Markiert in Bild 14. Graphisch gegenübergestellt sind die Messdaten den Simulationsdaten in Bild 15. Der Normalisierte mittlere Verzerrungsfehler NMBE („Normalized mean bias error“) stellt die durchschnittliche Abweichung zwischen den Mess- und Simulations-Ergebnisse dar und beträgt für einzelnen Punkte:

A1 -8,7 Prozent; A2 -5,9 Prozent; A3 -1,2 Prozent; A4 -3,3 Prozent; A5 -6,2 Prozent; A6 -3,3 Prozent;

A7 -3,65 Prozent und 5,84 Prozent der elektrischen Leistung und bewegt sich in einem Toleranzbereich von +/-10 Prozent. In der Messung lag die Temperatur meist etwas höher als in der Simulation, bei etwas geringerer eingebrachten Leistung. Dies deutet auf eine höhere Speicherfähigkeit des Simulationsmodells hin. Die Lüftungskanäle und elektrischen Heizelemente werden in der Anlagentechnik zwar korrekt mit der entsprechenden Querschnittsfläche bzw. deren Volumen berücksichtigt, jedoch wird dieses Volumen nicht im thermischen dreidimensionalen Modell abgezogen zu Gunsten der vereinfachten Modellierung und erheblichen Verringerung der Berechnungsdauer.

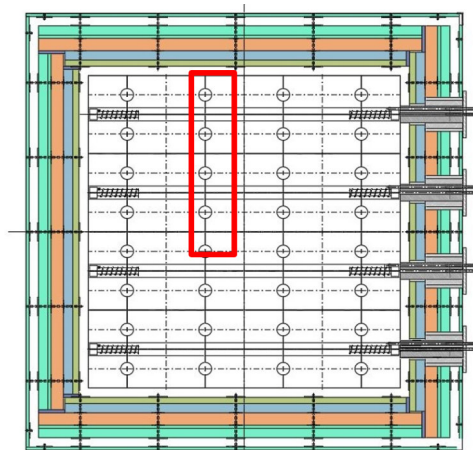


Bild 14:
Verortung der Messpunkte zum Vergleich mit Simulationsgrößen.

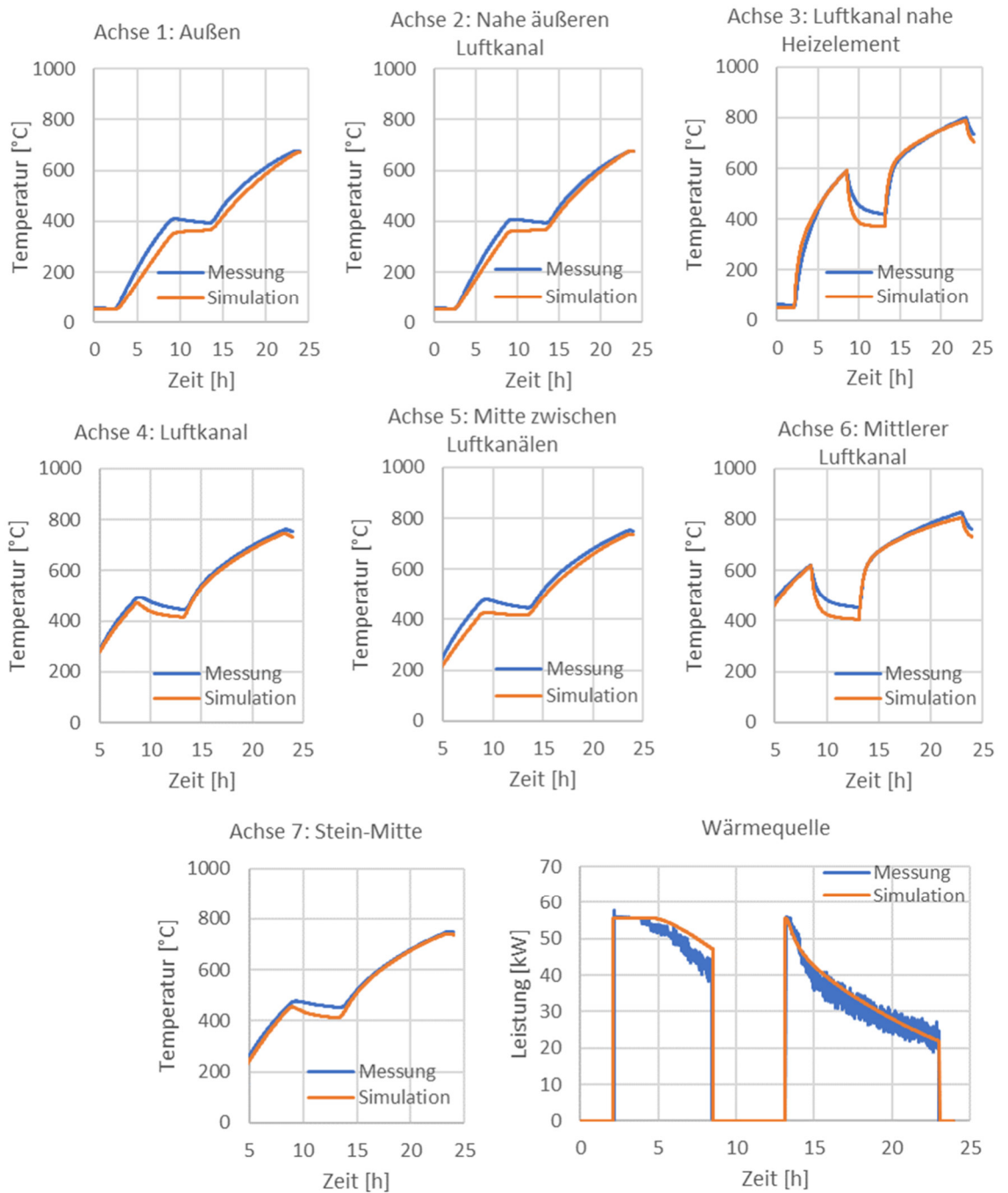


Bild 15:
Graphischer Vergleich von Messdaten und Simulationsdaten des HTSS-Systems.

Neben dem Messdatenvergleich wurde das Modell des HTSS-Systems auf Plausibilität, bzw. auf Energieerhaltung getestet. Grundsätzlich kann der Speicher nur so viel Energie abgeben, wie er zuvor aufgenommen hat. Bild 16 zeigt die simulierten Speichertemperaturen über 20 Tage und daneben die simulierten Wärmeströme im Stein des HTSS. Die Wärmemenge, die anfangs bei der Beladung eingebracht wurde, wird über den Verlauf über die Kernluft (aktiv), Spül- luft und Außenoberfläche (passive Entladung) wieder abgeben. Bild 17 zeigt weitere berechnete Wärmemengen und daneben die entsprechenden Bilanzen. So wird nachgewiesen, dass die Wärmemenge, welche über die Wärmetau- scher abgeführt wird, gleich der Wärmemenge ist, die über Kernluft und Spül- luft aus dem Speicher entnommen wird. Wird die Anforderung an Wärme- menge und Soll-Temperaturen zum Ende der Simulation nicht mehr über den Speicher erreicht, wird entsprechend nachgeheizt.

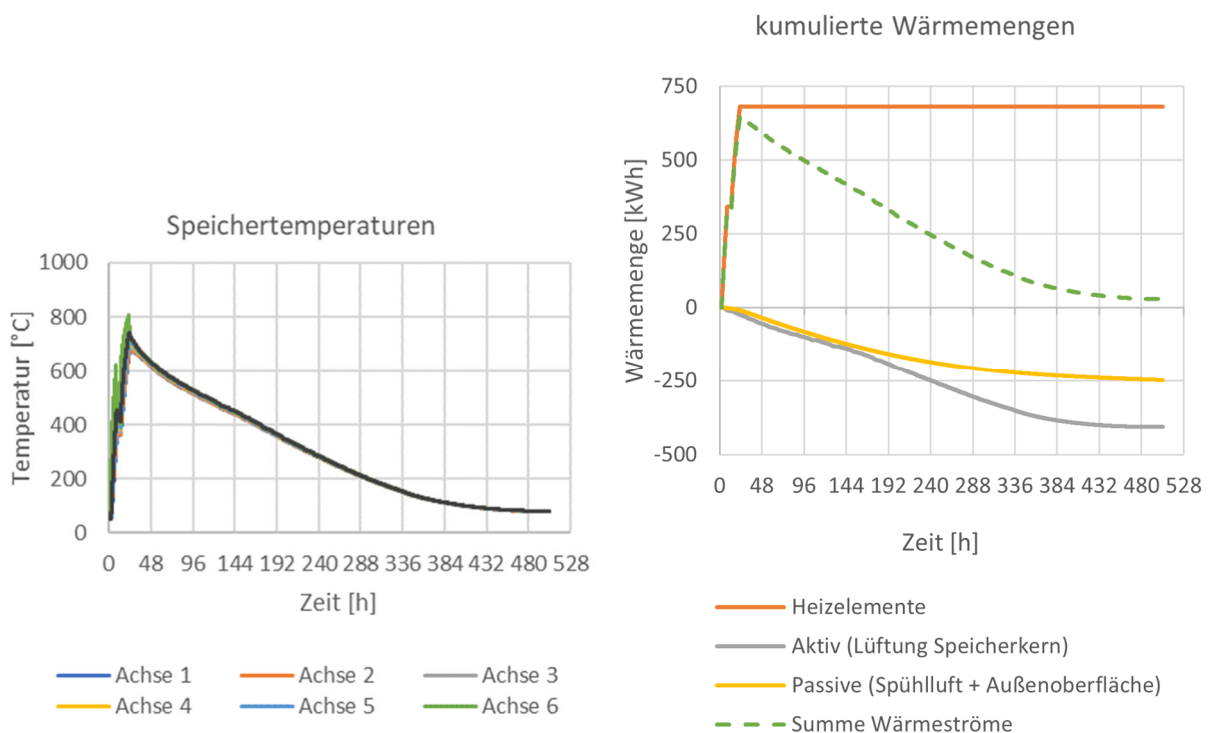


Bild 16:
HTSS: Simuliertes Systemverhalten mit Vollbeladung und anschließendem passi- ven und aktiven Entladen zur Gebäudeheizung und Trinkwarmwasser-Erwär- mung.

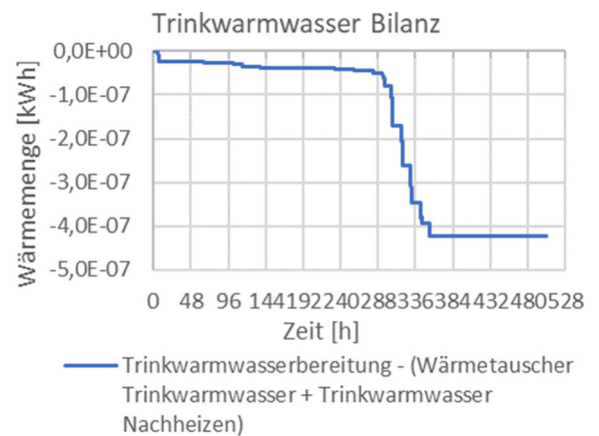
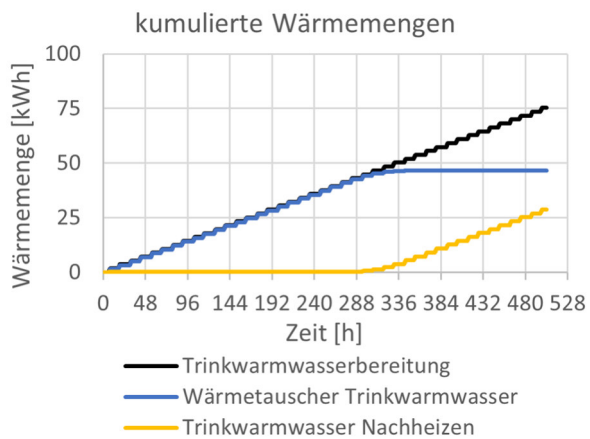
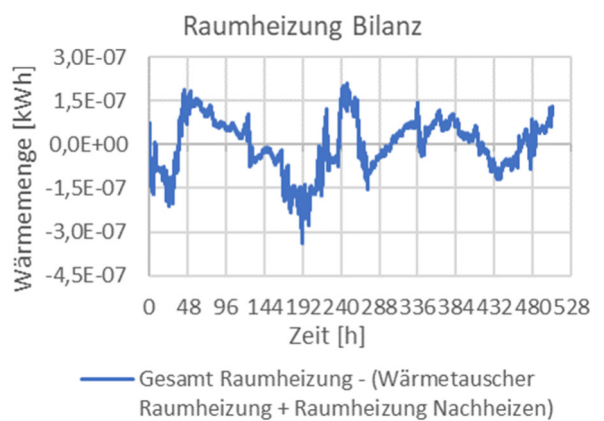
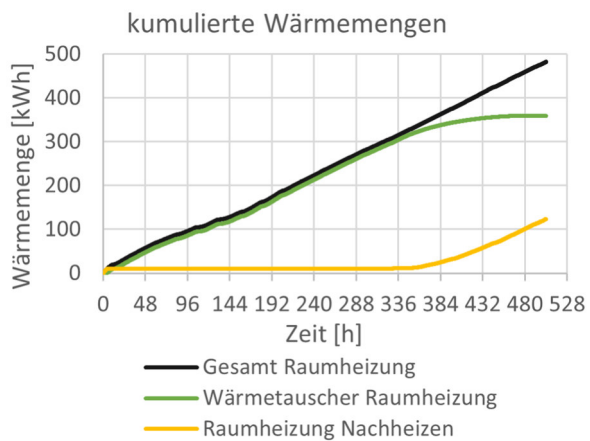
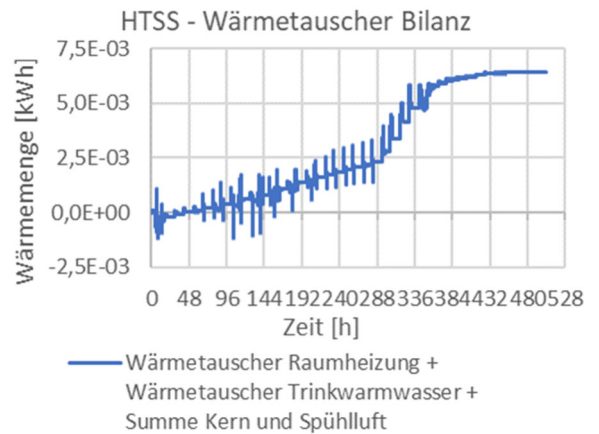
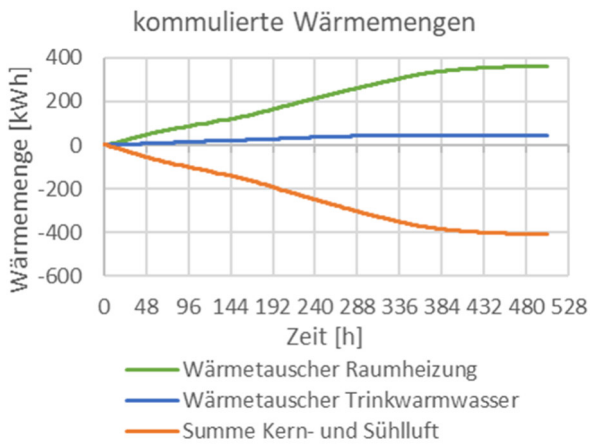


Bild 17:
HTSS: Testen einzelner Bilanzen von simulierten Wärmemengen zur Gebäude-
heizung und Trinkwarmwasserbereitung.

2.2 Entwicklung und Optimierung der BTA als Langzeit-Speicher

Gewöhnlich wird eine Bauteilaktivierung (BTA) ausschließlich zur kontinuierlichen oder tageszyklischen Gebäudebeheizung und –kühlung bzw. zu deren Unterstützung eingesetzt. Hierbei werden die BTAs derart mit warmem oder kühlem Wasser beschickt, dass die Rücklauftemperatur der BTA etwa in der Mitte des angestrebten Temperaturkorridors für die Raumlufttemperaturen liegt (Rücklauftemperatur-Regelung). Durch diese Temperierung innerhalb des Zielkorridors entsteht der sogenannte Selbstregeleffekt. Ist die Raumluft kühler als ihr Sollwert gibt die BTA Wärme an die Raumluft ab; ist die Raumluft wärmer wird sie durch die BTA gekühlt. Das Windheizung 2.0-Konzept nutzt die BTA zur Wärmespeicherung auf einem deutlich höheren Temperaturniveau, um die für längere Überbrückungszeiten notwendigen Wärmemengen aufnehmen zu können. Auf Grund des erhöhten Temperaturniveaus muss auf den Selbstregeleffekt verzichtet werden. Damit die verhältnismäßig große Temperaturdifferenz zwischen Bauteilmasse und Raumluft nicht zu ungewollter Überwärmung der Räume führt, muss eine gewisse Entkoppelung der BTA-Speichermassen von der Raumluft erreicht werden. Hierbei soll sowohl die unkontrollierbare passive Wärmeabgabe reduziert als auch ein aktives Entladen der Decken an die Raumluft ermöglicht werden.

2.2.1 Aufbau der BTAs

Generell können sowohl Decken als auch Wände als BTA-Speicher verwendet werden, wenn sie aus einem Material mit ausreichend hoher thermischer Masse und Wärmeleitfähigkeit bestehen. Von der Wärmespeicherung in Bauteilen der wärmetauschenden Hüllfläche sollte auch bei sehr energieeffizienten Bauteilen möglichst abgesehen werden, da die erhöhte Temperaturdifferenz zwischen innen und außen die Transmissionswärmeverluste eines Windheizung 2.0-Gebäudes erhöhen würde. Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens werden sowohl Neubauten betrachtet als auch Sanierungslösungen erarbeitet. Für die unterschiedlichen Anwendungsfälle werden die folgenden Konstruktionen betrachtet.

Neubau-Decken

Bei den Deckenlösungen für den Neubaufall stehen im Projekt zu Beginn vier unterschiedliche Systeme zur Auswahl. Diese Systeme unterscheiden sich bezüglich des Wärmerückhaltevermögens wie auch in den Investitionskosten, wobei die Systeme mit höherer Wärmerückhaltung entsprechend teurer sind. In Tabelle 1 ist eine Übersicht über diese vier betrachteten Varianten dargestellt. Diese Decken bestehen jeweils aus einem Beton-Halbfertigteil in dem das raumnahe Wasserregister der Flächenheizung zur aktiven Wärmeabgabe bereits werksseitig enthalten ist, während das obere Wasserregister zur BTA-Be- und Entladung auf der Baustelle in die Ortbetonerfüllung eingebaut wird. Lediglich bei Typ 4 sind beide Register bereits werksseitig im Halbfertigteil vormontiert.

In einem ersten Schritt werden die einzelnen Deckenvarianten auf ihr Verhalten bei rein passiver Entladung untersucht. In einem zweiten Schritt wird die aktive Entladung inkl. Wärmeabgabe an den Raum bei allen vier Typen betrachtet.

Tabelle 1:
Übersicht über die vier Typen der Neubau-Decken-BTA des Unternehmens
Concrete Rudolph GmbH.

| Typ | Wärmerückhalte- vermögen | Preisansatz (Netto) | Darstellung |
|------|-----------------------------|------------------------------|-------------|
| Typ1 | Standard BTA | 146,- [€/m ²] | |
| Typ2 | niedrig | 159,- [€/m ²] | |
| Typ3 | mittel | 178,- [€/m ²] | |
| Typ4 | hoch | 195,- [€/m ²] | |

Sanierungs-Decken

Auf Grund des großen Gebäudebestands in Deutschland ist das im Sanierungsbereich vorhandene Markt- und Energieeinsparpotential von großer Bedeutung, v.a. da viele Bestandsobjekte bereits über (Stahl-)Betondecken mit großer (Speicher-)Masse verfügen. Bei Bestandsdecken ist es jedoch nicht möglich, die zur Aktivierung notwendigen Rohre nachträglich direkt in die Decke einzubringen. Stattdessen wird, wie in Bild 18 dargestellt, auf die Unterseite der bestehenden Decke eine Lage Rohrregister, inklusive Wärmeleitbleche, temperaturschlüssig angebracht. Diese Lage wird überdämmt und ähnlich wie die Neubaudecken mit einem oberflächennahen Rohrregister zur aktiven Wärmeabgabe an den darunterliegenden Raum ausgestattet, wobei ein Leichtbau-System, ebenfalls mit Wärmeleitblechen, zum Einsatz kommt.

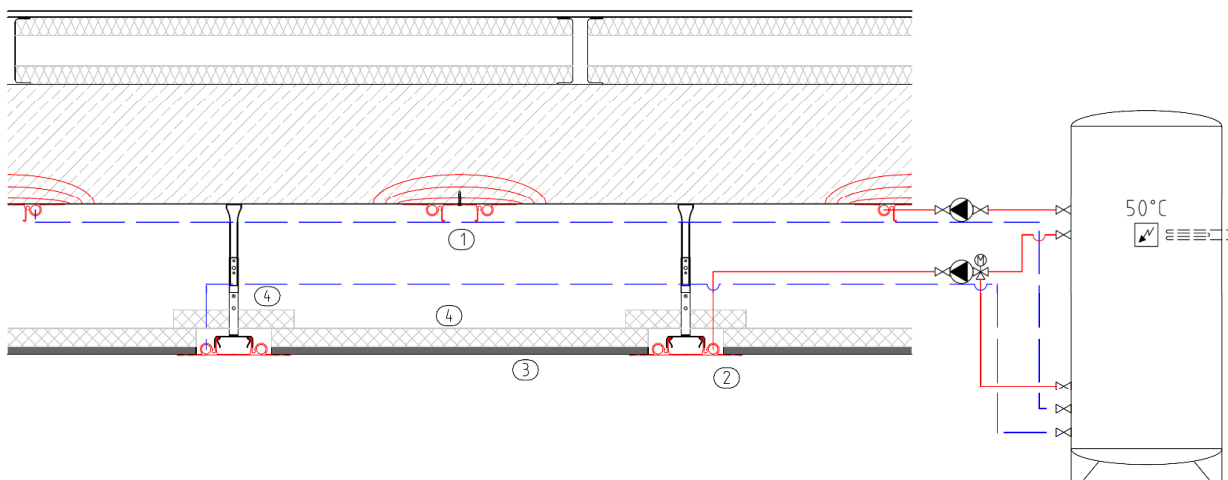


Bild 18:

Schematische Darstellung der Decken-Sanierungslösung des Projektpartners Klima-Top.

1) Belade-Profil „Raum-K Buffer“, 2) Raumseitiges Profil zur aktiven Entladung und Nachheizung „Raum-K Grid“, 3) Tragplatte (z.B. Gips- oder Mineralfaserplatte), 4) Dämmplatte zur thermischen Entkoppelung des BTA-Speichers inkl. Überdämmung des raumseitigen Profils zur thermischen Entkoppelung des BTA-Speichers.

Um die Bauteilmasse als BTA-Speicher aktivieren zu können, muss das Bauteil an die hydraulische Wärmeverteilung des Windheizung 2.0-Gebäudes angekoppelt werden. Hierzu wurden speziell entwickelte Aluminiumprofile verwendet. Diese in Bild 19 dargestellten Profile sind eine Eigenentwicklung des Projektpartners Klimatop („Raum-K Buffer“). Diese Profile werden, unter Verwendung einer mineralischen Ausgleichsmasse, temperaturschlüssig mit der Bestandsdecke verbunden. Die Festlegung des Profilabstands wird in Abschnitt 2.2.4 beschrieben. Zur aktiven Wärmeübertragung an den unter dem BTA-Speicher liegenden Raum werden ähnliche Aluminiumprofile „Raum-K Grid“ (weiß lackiert) des Projektpartners Klimatop verwendet (siehe Bild 20). Die Wärmedämmung zur thermischen Entkoppelung zwischen Raum und BTA-Speicher wird auf die abgehängten Profile aufgelegt. Um eine möglichst geringe Deckenabhängung zu erreichen und damit die lichte Raumhöhe nur

geringfügig zu reduzieren wird das Dämmmaterial Calostat (Evonic) mit einer Wärmeleitfähigkeit von 0,019 W/m eingesetzt.



Bild 19:
Darstellung des Wärmeleitprofils „Raum-K Buffer“ zur thermischen Aktivierung von Bauteilmassen als BTA-Speicher.

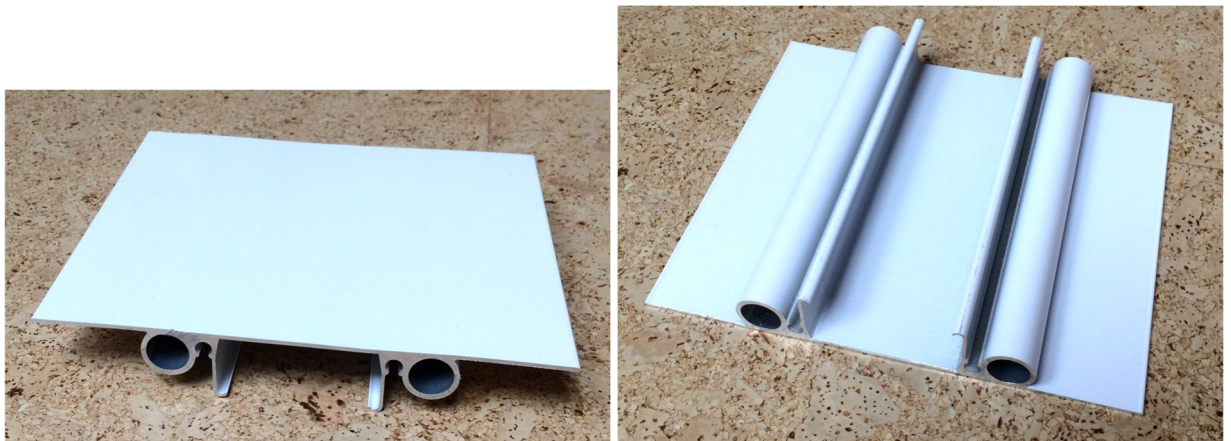


Bild 20:
Darstellung des Profils „Raum-K Grid“ zur aktiven Wärmeabgabe an den Raum; links: raumseitige Untersicht, rechts: deckenseitige Aufsicht.

Um eine gute Verarbeitbarkeit zu gewährleisten, wurden von Klimatop in Zusammenarbeit mit dem Hersteller Evonic mit Glasfaser-Vlies kaschierte Calostat-Dämmplatten entwickelt. Zudem wurde das System um umlaufende Profile an den Wandanschlüssen ergänzt, die eine optisch ansprechende Trennung zwischen der Raumluft und dem Luftspalt unterhalb des BTA-Speichers herstellen. Der finale, am IBP-Zwillingshaus N2 realisierte Aufbau der Sanierungs-Speicherdecke ist in Bild 21 dargestellt.

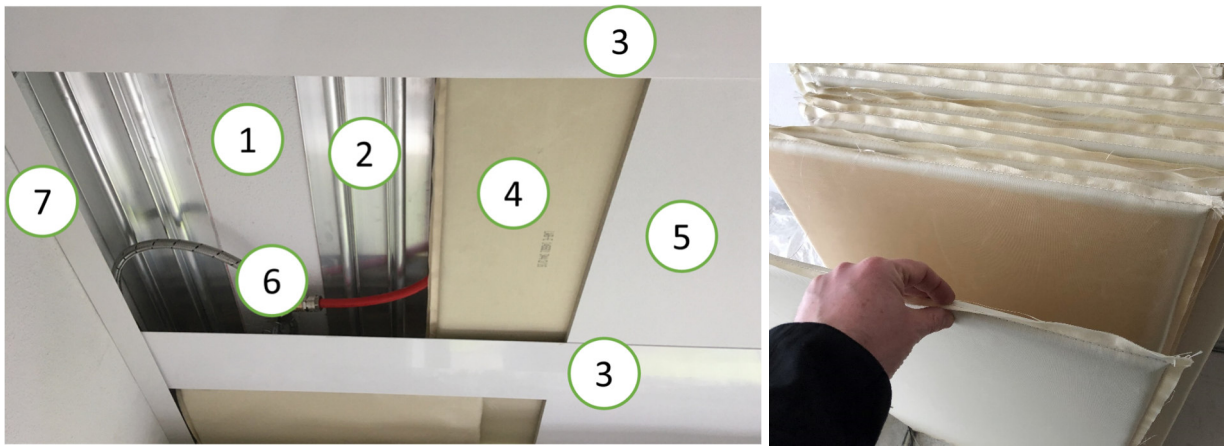


Bild 21:

Links: Geöffneter, überarbeiteter Aufbau des BTA-Speichers für Sanierungs-Decken.

1) Bestands-Betondecke; 2) BTA-Beladeprofil „Raum-K Buffer“; 3.) Profile der aktiven Entladung „Raum-K Grid“; 4) Glasfaser kaschierte Calostat-Dämmplatte; 5) Tragplatte; 6) Hydraulische Kuppelung zur Medienversorgung; 7) Randprofil zum Abschluss des Luftraums.

Rechts: Kaschierte Dämmplatten.

Neubau-Wand

Um die für Windheizung 2.0 notwendigen Wärmemengen in einer Wand-BTA einspeichern zu können, müssen diese Wände aus einem entsprechenden schweren Baustoff wie z.B. schweren Kalksandstein (KS)-Blöcken bestehen. Zur Aktivierung der Neubauwände wird ein KS-XK-Wandtemperierungssystem verwendet (siehe Bild 22, links). Hier werden nach dem konventionellen Aufmauern der Wände von oben fertige 2,40 m lange Heizrohre in der KS-Wand eingeschoben. Der verbleibende Spalt zwischen den Heizrohren und den Steinen wird zur Verbesserung der Wärmeübertragung mit einem sehr feinkörnigen, fließfähigen Sand verfüllt. Die horizontalen Vor- und Rücklaufstränge zur Versorgung der in die Konstruktion eingegossenen vertikalen Übergabeleitungen werden in der Regel in die aufliegende Ortbetondecke eingegossen.

Damit ein KS-XK-Wandtemperierungssystem das für das Windheizung 2.0-Konzept nötige Wärmerückhaltevermögen und eine steuerbare aktive Entladung aufweist, wird die Wand zusätzlich, wie in rechts in Bild 22 dargestellt, beidseitig gedämmt. Die aktive Wärmeabgabe ist nur einseitig vorgesehen. Da auf Grund des geringen Wärmebedarfs des Gebäudes die einseitige Wärmeübertragungsleistung ausreichend sein sollte, wird aus ökonomischen Erwägungen auf eine 2-seitige Flächenheizung verzichtet.

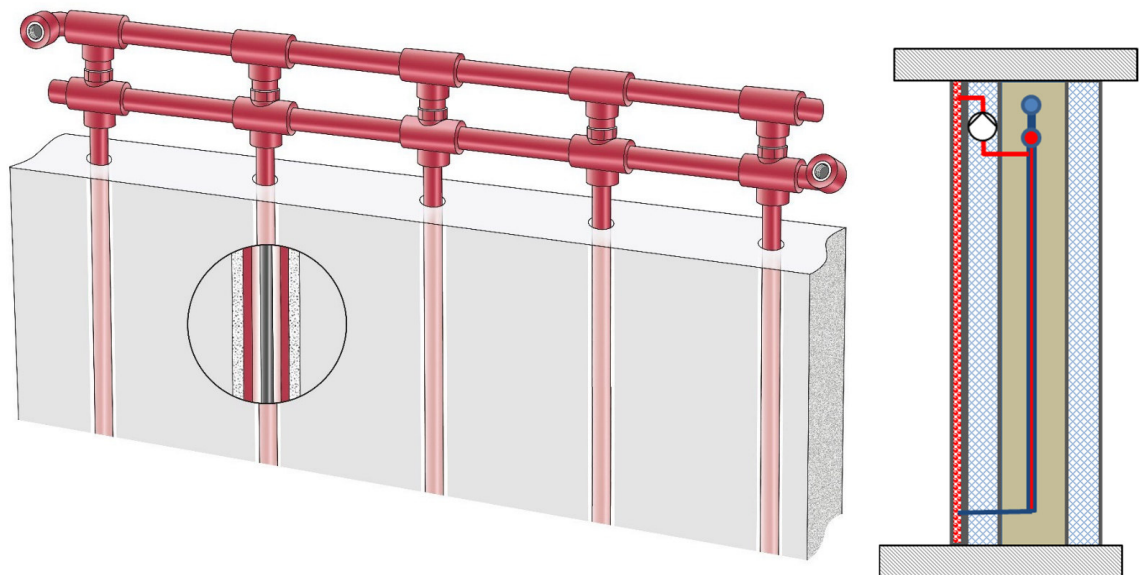


Bild 22:

Links: Systemskizze des KS-XK-Wandtemperierungssystems ohne die Windheizung 2.0 typische Überdämmung und ohne das äußere Rohrregister zur aktiven Wärmeabgabe an die Raumluft.

Rechts: Systemskizze einer Windheizung 2.0-KS-XK-Wandtemperierung.

Die Kalksandsteinwand wird beidseitig mit Calostat-Dämmung belegt (geringe Wärmeleitfähigkeit), um den Bauteilaufbau möglichst dünn zu gestalten und damit die Wohnfläche möglichst wenig zu verringern. Für die aktive Entladung in die angrenzenden Räume kommen mit Aluminium-Verbundrohren belegte Wärmeleitprofile von Typ KlimaSan des Projektpartners Klimatop (siehe Bild 23) zum Einsatz. Den raumseitigen Bauteilabschluss bildet eine Trockenbauschale aus 1-lagigen Gipskartonplatten.



Bild 23:

Wärmeleitprofile (Material Stahl, alternativ Aluminium) vom Typ KlimaSan (Fa. Klimatop) inkl. rotem Aluminium-Verbundrohr.

Sanierungs-Wand

Analog zur Sanierungslösung für Decken-BTAs wird die Regelbarkeit einer Sanierungs-Wand-BTA über eine 1-seitige, wasserbasierte, aktive Wärmeübergabeeinrichtung und eine beidseitige Bauteildämmung erreicht. Dieses System ist in Bild 24 schematisch dargestellt. Zur Aktivierung der Bauteilmasse als BTA-Speicher kommen die bereits bei den Sanierungs-Decken beschriebenen Aluminiumprofile (Klima-Top) zum Einsatz. Die aktive Wärmeabgabe an den Raum erfolgt, wie bei den Neubau-Wänden, über das KlimaSan-System (Klima-Top).

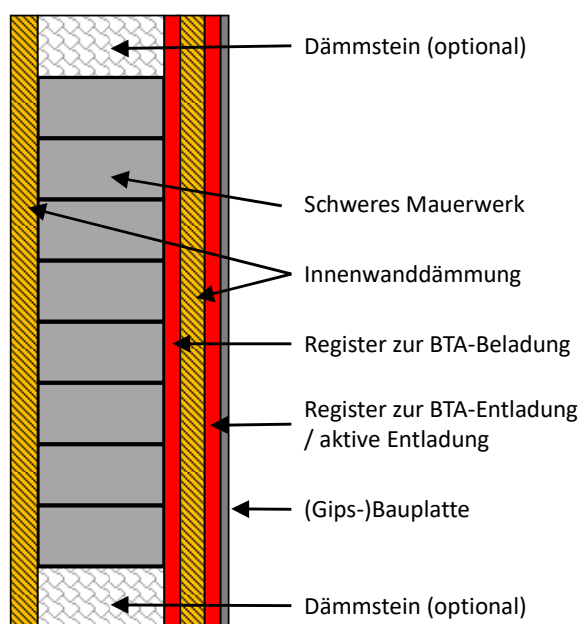


Bild 24:
Systemskizze der Windheizung 2.0-Sanierungs-BTA-Wand.

2.2.2 Bewertung der umlaufenden Speicher-Wärmebrücke bei BTA-Speichern

Sowohl bei Wand- als auch bei den Decken-BTA-Systemen treten trotz überdämmter Bauteilfläche passive Wärmeströme in den angrenzenden Raum auf. Diese „Speicherverluste“ lassen sich einfach über eine 1-dimensionale Berechnung abschätzen und skalieren sich proportional zur Bauteilfläche. Zusätzlich zu den eindimensionalen Transmissionswärmeströmen entsteht an der Kontaktfläche zwischen Wand- und Deckenkern (Deckeneinbindung) eine umlaufende Wärmebrücke, da diese statisch wirksame Kontaktfläche nicht mit Dämmstoff belegt werden kann. Die Auswirkung dieser Einbindungs-Wärmebrücke skaliert sich bei Wänden proportional zur Wandlänge und bei Decken-BTAs aus dem Verhältnis zwischen Bauteilfläche und –umfang.

Im Neubaufall kann bei der Decken-BTA und am unteren Abschluss der Wand-BTA ein statisch voll tragfähiger Dämmstein (z.B. KS-Kimmstein, Wärmeleitfähigkeit $0,27 \text{ W/(mK)}$) eingesetzt werden. Bei nichttragenden Wänden kann alternativ ein Porenbetonstein mit einer noch geringeren Wärmeleitfähigkeit von

0,11 W/(mK) verwendet werden. Zudem wird eine weitere klassische Einbausituation untersucht, in der die obere und untere BTA-Deckeneinbindung mit Hochlochziegeln realisiert wird. Die Hochlochziegel werden vereinfacht über zwei vertikale Ziegelschichten und eine Luftschicht mit je 15 mm Dicke abgebildet. Bei bestehenden Wänden ist der Austausch von Steinen in der Regel nicht sinnvoll möglich. Bei der Neubauwand-BTA ergibt sich am oberen Ende Kontakt zur Ortbetondecke, in die die horizontalen Versorgungsleitungen einbetoniert werden können. In diesen Fällen kann ein Dämmkeil angebracht werden, um die Einbindungs-Wärmebrücke zu reduzieren. Tabelle 2 listet die möglichen Maßnahmen zur Reduktion der Einbindungswärmebrücke in Abhängigkeit von der Bausituation auf.

Tabelle 2:
Maßnahmenübersicht zur Reduktion der Einbindungs-Wärmebrücke.

| Einbindung | Bausituation | | |
|------------------------|--------------|----------------------------------|----------------------------|
| | Neubau | Sanierung, teils neue Innenwände | Sanierung; Bestandswand |
| Decken-BTA, nach oben | Dämmstein | Mischung Dämmstein / -Keil | Dämmkeil |
| Decken-BTA, nach unten | Dämmstein | Mischung Dämmstein / -Keil* | Dämmkeil* |
| Wand-BTA, oben | Dämmkeil | Dämmstein | Dämmkeil |
| Wand-BTA, unten | Dämmstein | Dämmstein | - (nur Trittschalldämmung) |

*: Ausbildung als umlaufende Vorsatzschale bzw. Installationsvorwand mit ca. 1 m Höhe (mit entsprechendem Wohnflächenverlust).

Der Einfluss dieser Wärmebrücken aus dem Speicher in die Innenräume kann unter Verwendung einer 2D-Wärmebrückenrechnung abgeschätzt werden. Bild 25 zeigt eine solche Abschätzung beispielhaft für die Einbindung der Decken-BTA mit Porenbeton-Dämmstein; Tabelle 3 zeigt die entsprechenden Ergebnisse. Hier kann man erkennen, dass ja nach Raumgeometrie die Einbindungsverluste 21 – 42 Prozent betragen und durch den Einsatz von Dämmsteinen auf 6 – 15 Prozent gesenkt werden können.

Bild 26 und Tabelle 3 zeigen die entsprechenden Berechnungen für die Wand-Einbindung mit Dämmsteinen. Hier zeigt sich, dass die Einbindungsverluste von 31 Prozent auf 8 Prozent gesenkt werden können.

Die hier untersuchte Dämmkeillösung mit einer 2 cm dicken und 20 cm hohen Mineralwollplatte zeigt generell eine eher geringe Auswirkung. Nach dem Wechsel auf das alte KS-Wandtemperierungssystem (siehe Abschnitt 2.4.4, Bild 89 rechts) wäre auch oben ein Dämmstein möglich, da hier die Installation der Verrohrung zur BTA-Beladung bzw. der notwendigen horizontalen Verteilung nicht über den Wandkopf erfolgt (die Verteilung wird anschließend in die darüber liegende Decke einbetoniert). Bei dem älteren System erfolgt die Verteilung über zwei horizontale Einschlitzungen am unteren und oberen Ende der Wand.

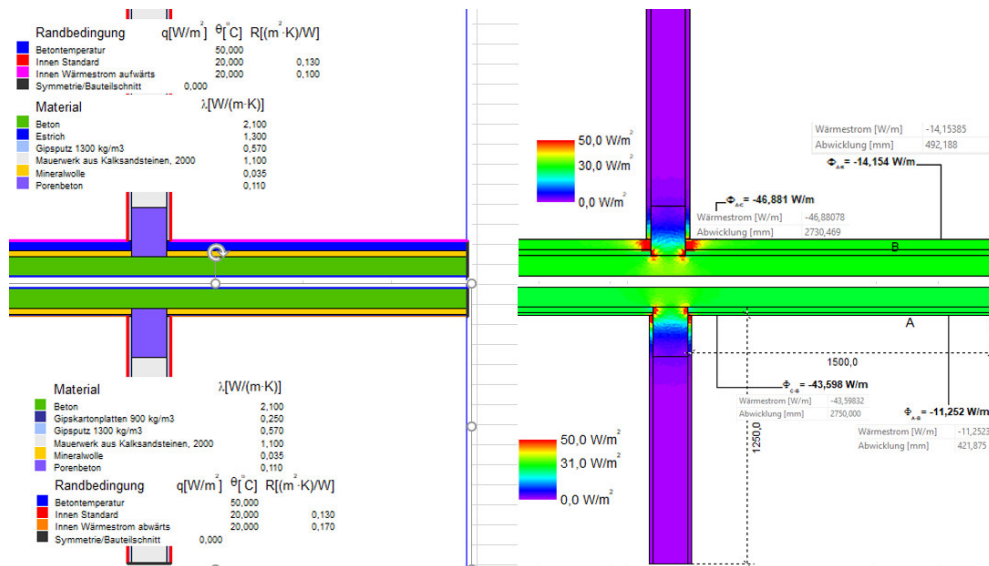


Bild 25: Eingabemodell (links) und Wärmestrom-Dichtefeld (rechts) für die untere und obere Einbindung der Decken-BTA mit Dämmstein am Beispiel des Porenbetonsteins für eine unterseitige Überdämmungsstärke von 3 cm.

Tabelle 3:
 Einbindungsverluste der Decken-BTA ohne und mit Dämmstein und inkl. einer Dämmung der Deckenunterseite für fünf unterschiedliche Raumgeometrien. Die Dicke der Trittschalldämmung auf der Deckenoberseite beträgt 3 cm, die Dämmungsdicke an der Deckenunterseite wird hier mit 3 cm und 10 cm betrachtet.

| Raumtyp | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---|------|------|------|------|-------|
| Länge [m] | 3 | 3 | 5 | 5 | 8 |
| Breite [m] | 3 | 5 | 5 | 8 | 8 |
| Fläche [m ²] | 9 | 15 | 25 | 40 | 64 |
| Umfang [m] | 12 | 16 | 20 | 26 | 32 |
| Dämmung 3 cm (unten + oben) ohne Dämmstein | | | | | |
| Wärmeverlust ohne Einbindung [W/K] | 16,6 | 27,7 | 46,2 | 73,9 | 118,2 |
| Wärmeverlust der Einbindung [W/K] | 12,0 | 16,0 | 20,0 | 26,0 | 31,9 |
| Summe Wärmeverlust [W/K] | 28,6 | 43,7 | 66,2 | 99,9 | 150,2 |
| Anteil Einbindung [%] | 42 % | 37 % | 30 % | 26 % | 21 % |
| Dämmung 3 cm (unten + oben) Dämmstein (Porenbeton) | | | | | |
| Wärmeverlust ohne Einbindung [W/K] | 16,6 | 27,7 | 46,2 | 73,9 | 118,2 |
| Wärmeverlust der Einbindung [W/K] | 2,9 | 3,9 | 4,9 | 6,4 | 7,8 |
| Summe Wärmeverlust [W/K] | 19,6 | 31,6 | 51,1 | 80,3 | 126,1 |
| Anteil Einbindung [%] | 15 % | 12 % | 10 % | 8 % | 6 % |
| Dämmung 3 cm (unten + oben), KS-Dämmstein | | | | | |
| Wärmeverlust ohne Einbindung [W/K] | 16,6 | 27,7 | 46,2 | 73,9 | 118,2 |
| Wärmeverlust der Einbindung [W/K] | 6,4 | 8,5 | 10,6 | 13,8 | 17,0 |
| Summe Wärmeverlust [W/K] | 23,0 | 36,2 | 56,8 | 87,7 | 135,2 |
| Anteil Einbindung [%] | 28 % | 23 % | 19 % | 16 % | 13 % |
| Dämmung 3 cm (unten + oben), Ziegel | | | | | |
| Wärmeverlust ohne Einbindung [W/K] | 16,6 | 27,7 | 46,2 | 73,9 | 118,2 |
| Wärmeverlust der Einbindung [W/K] | 6,3 | 8,4 | 10,5 | 13,7 | 16,9 |
| Summe Wärmeverlust [W/K] | 23,0 | 36,2 | 56,7 | 87,6 | 135,1 |
| Anteil Einbindung [%] | 28 % | 23 % | 19 % | 16 % | 12 % |
| Dämmung 3 cm (unten + oben), Dämmkeil (2 x 20 cm) | | | | | |
| Wärmeverlust ohne Einbindung [W/K] | 16,9 | 28,2 | 47,0 | 75,2 | 120,3 |
| Wärmeverlust der Einbindung [W/K] | 9,6 | 12,9 | 16,1 | 20,9 | 25,7 |
| Summe Wärmeverlust [W/K] | 26,6 | 41,1 | 63,1 | 96,1 | 146,1 |
| Anteil Einbindung [%] | 36 % | 31 % | 25 % | 22 % | 18 % |

| | | | | | |
|---|------|------|------|------|-------|
| Raumtyp | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Länge [m] | 3 | 3 | 5 | 5 | 8 |
| Breite [m] | 3 | 5 | 5 | 8 | 8 |
| Fläche [m ²] | 9 | 15 | 25 | 40 | 64 |
| Umfang [m] | 12 | 16 | 20 | 26 | 32 |
| Dämmung 10 cm unten, 3 cm oben, ohne Dämmstein | | | | | |
| Wärmeverlust ohne Einbindung [W/K] | 11,5 | 19,2 | 32,0 | 51,1 | 81,8 |
| Wärmeverlust der Einbindung [W/K] | 10,6 | 14,1 | 17,6 | 22,9 | 28,2 |
| Summe Wärmeverlust [W/K] | 22,1 | 33,3 | 49,6 | 74,0 | 110,0 |
| Anteil Einbindung [%] | 48 % | 42 % | 36 % | 31 % | 26 % |
| Dämmung 10 cm unten, 3 cm oben, Dämmstein (Porenbeton) | | | | | |
| Wärmeverlust ohne Einbindung [W/K] | 11,5 | 19,2 | 32,0 | 51,1 | 81,8 |
| Wärmeverlust der Einbindung [W/K] | 2,3 | 3,1 | 3,8 | 5,0 | 6,1 |
| Summe Wärmeverlust [W/K] | 13,8 | 22,2 | 35,8 | 56,1 | 88,0 |
| Anteil Einbindung [%] | 17 % | 14 % | 11 % | 9 % | 7 % |
| Dämmung 10 cm unten, 3 cm oben, KS-Dämmstein | | | | | |
| Wärmeverlust ohne Einbindung [W/K] | 11,5 | 19,2 | 32,0 | 51,1 | 81,8 |
| Wärmeverlust der Einbindung [W/K] | 5,4 | 7,3 | 9,1 | 11,8 | 14,5 |
| Summe Wärmeverlust [W/K] | 16,9 | 26,4 | 41,0 | 62,9 | 96,3 |
| Anteil Einbindung [%] | 32 % | 27 % | 22 % | 19 % | 15 % |

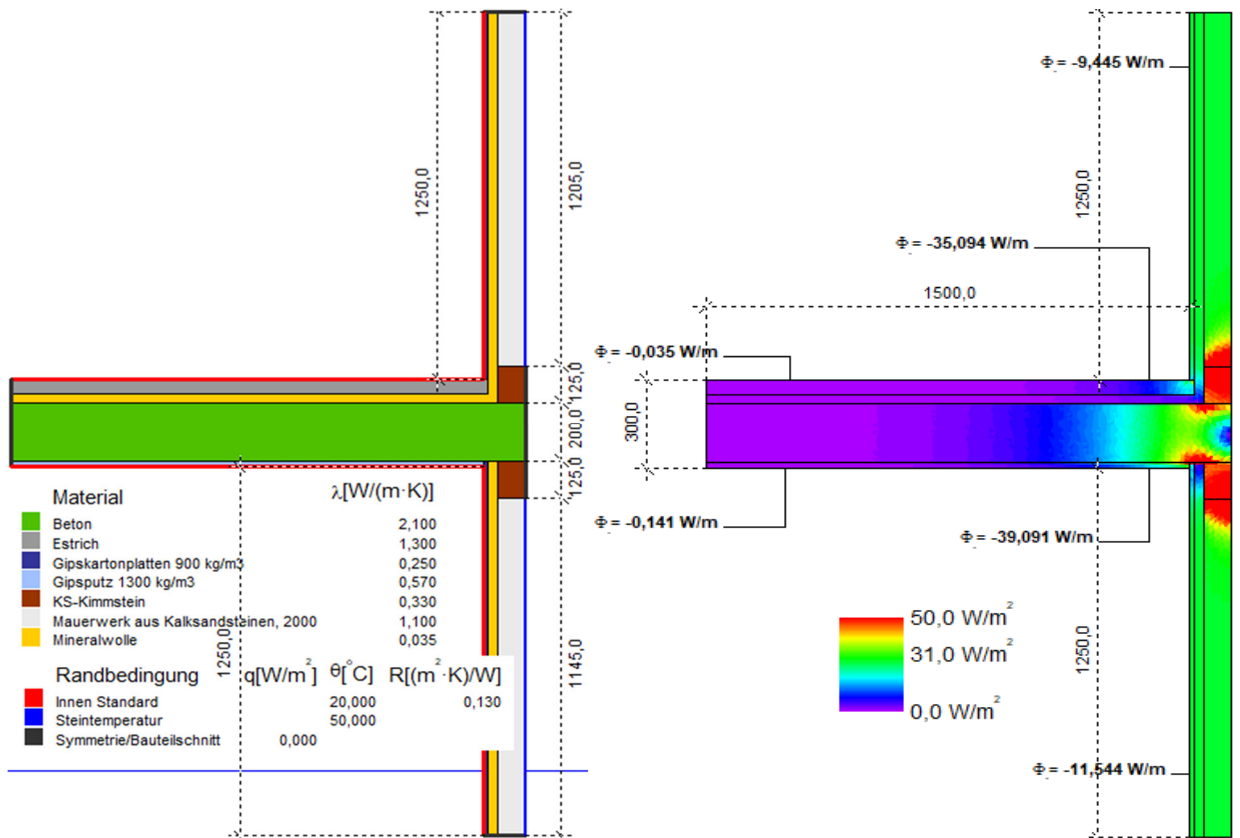


Bild 26:
Eingabemodell (links) und Wärmestrom-Dichtefeld (rechts) für die untere und obere Einbindung der Wand-BTA mit Dämmstein am Beispiel des Porenbetonsteins für eine Überdämmungsstärke von 3 cm.

Tabelle 4:
Einbindungsverluste der Wand-BTA ohne und mit Dämmstein für eine lichte Raumhöhe von 2,50 m und eine Überdämmungsstärke von 3 cm.

| | |
|--|------|
| lichte Raumhöhe [m] | 2,5 |
| Dämmung 3 cm (50 °C bis Roh-Decke) | |
| Wärmeverlust ohne Einbindung [W/(mK)] | 2,24 |
| Wärmeverlust der Einbindung [W/(mK)] | 1,03 |
| Summe Wärmeverlust [W/K] | 3,27 |
| Anteil Einbindung [%] | 31 % |
| Dämmung 3 cm (50 °C bis Porenbeton-Dämmstein) | |
| Wärmeverlust ohne Einbindung [W/(mK)] | 1,88 |
| Wärmeverlust der Einbindung [W/(mK)] | 0,16 |
| Summe Wärmeverlust [W/K] | 2,04 |
| Anteil Einbindung [%] | 8 % |
| Dämmung 3 cm (50 °C bis KS-Dämmstein) | |
| Wärmeverlust ohne Einbindung [W/(mK)] | 2,10 |
| Wärmeverlust der Einbindung [W/(mK)] | 0,37 |
| Summe Wärmeverlust [W/K] | 2,47 |
| Anteil Einbindung [%] | 15 % |
| Dämmung 3 cm (50 °C Dämmkeil, 2 x 20 cm)) | |
| Wärmeverlust ohne Einbindung [W/(mK)] | 2,24 |
| Wärmeverlust der Einbindung [W/(mK)] | 0,80 |
| Summe Wärmeverlust [W/K] | 3,04 |
| Anteil Einbindung [%] | 26 % |
| Dämmung 3 cm (50 °C ab PB-Dämmstein unten bis Betondecke) | |
| Wärmeverlust ohne Einbindung [W/(mK)] | 2,09 |
| Wärmeverlust der Einbindung [W/(mK)] | 0,78 |
| Summe Wärmeverlust [W/K] | 2,86 |
| Anteil Einbindung [%] | 27 % |
| Dämmung 3 cm (50 °C ab KS-Dämmstein unten bis Betondecke) | |
| Wärmeverlust ohne Einbindung [W/(mK)] | 2,20 |
| Wärmeverlust der Einbindung [W/(mK)] | 0,79 |
| Summe Wärmeverlust [W/K] | 2,99 |
| Anteil Einbindung [%] | 27 % |

2.2.3 Simulation der Neubau-Decken

Die Simulationen der raumklimatischen und energetischen Bedingungen in der Neubau-Decken Varianten werden mit Hilfe des am Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP, Holzkirchen, entwickelten Programms WUFI® Plus durchgeführt [4]. Neben dem im Standardfall eindimensionalen Wärme- und Feuchtetransport über Gebäudebauteile (Wände, Böden, Decken, Fenster) können sämtliche, in Gebäuden übliche, das Raumklima beeinflussende Wärmeströme abgebildet werden. Für eine eingestellte Zeitschrittgröße, bei üblicher Gebäudesimulation Ein-Stunden-Schritte, werden Raumlufttemperatur, Raumluftfeuchte, Oberflächentemperaturen aber auch Temperaturen in den Bauteilmaterialschichten sowie sämtliche Wärme- und Feuchteströme, errechnet und bewertet.

Neben der eindimensionalen Erfassung der Wärmeströme und Temperaturprofile über opake und transparente Gebäudebauteile ist ein Modul zur dynamischen Betrachtung von zwei- oder dreidimensionalen von Wärmebrücken implementiert. Für diese Berechnung wird die Finite-Volumen-Methode von Eymard [6] angewendet. Diese in WUFI® Plus implementierte Methode ist unter anderen nach DIN EN ISO 10211 [7] validiert. Basierend auf dem thermodynamischen Gesetz der Energieerhaltung und der physikalischen Interpretation des Wärmestroms und der Wärmespeicherung ist das Modell für die Simulation von Gebäudebauteilen für den üblichen Anwendungsfall der Wärmebrücken geeignet. Bei dieser Methode wird der dreidimensionale Raum in kleine Volumen aufgeteilt und mittels der numerischen Lösung von Integralen der Wärmestrom über die Volumen-Begrenzungsflächen sowie die Temperatur innerhalb der Volumen bestimmt. An den Bauteiloberflächen können Außen- oder Innenraumklimata angesetzt werden. Die gegenseitige Wechselwirkung zwischen Bauteil und Innenraum wird in jedem Zeitschritt berücksichtigt.

Bei der detaillierten Simulation der Windheizung 2.0-Neubaudecken ist die Wechselwirkung zwischen Raum und Decke besonders wichtig, da sich hier auf Grund der kombinierten Speicher- und Wärmeübergabefunktion hohe Wärmeströme einstellen. Da es sich um einen inhomogenen Bauteilaufbau (Deckentyp 2 & 3, Tabelle 1) handelt, ist eine zweidimensionale Abbildung in der detaillierten Simulation notwendig. Weiterführend kann so die Wärmeausbreitung über die BTA-Rohre detailliert abgebildet werden.

Im abgeschlossenen Projekt [8] wurden Anlagentechnikkomponenten betrachtet und der Gebäudesimulationssoftware WUFI Plus hinzugefügt. Dabei wurde auch ein TABS-Modell (Thermo-Aktives-Bauteil-System) betrachtet und implementiert. Es berechnet den abgegebenen bzw. aufgenommenen Wärmestrom über Wärmeleitung durch ein im Bauteil liegendes Rohr in Abhängigkeit von den Temperaturverhältnissen zwischen fließendem Medium und Umgebung. Die Länge des Rohres kann diskretisiert bzw. unterteilt werden und somit die Temperatur des fließenden Mediums in jedem Teilabschnitt berechnet werden.

Zur Betrachtung von Windheizung 2.0-BTA-Speichern wurde dieses TABS- bzw. BTA-Rohr-Modell mit der zwei- bzw. dreidimensionalen Bauteilsimulation gekoppelt. Dazu wird die Lage in X-, Y- und Z-Richtung des BTA-Rohres im inhomogenen Bauteil definiert. Das BTA-Rohr wird somit im Bauteilquerschnitt verlegt und interagiert mit diesem. Zur Validierung wurden Vergleichssimulationen einer eindimensionalen Situation mit einem bestehendem Modell im Vergleich zu dem neu gekoppelten Modell durchgeführt (Bild 27). Die Ergebnisse zeigen eine gute Übereinstimmung bei gleichen Randbedingungen (Bild 28).

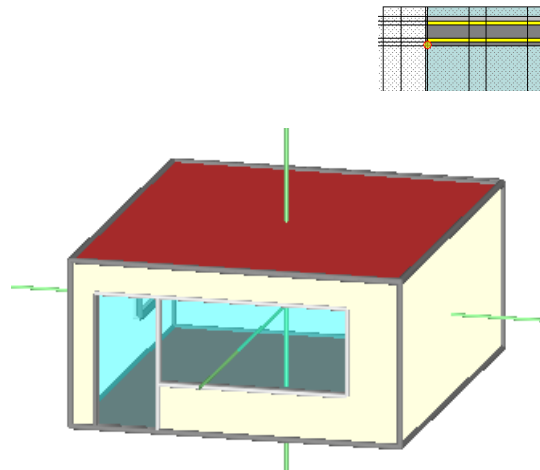


Bild 27:
Ansicht des Raummodells in WUFI® Plus mit TABS- bzw. BTA-Modell in der Decke (rot).

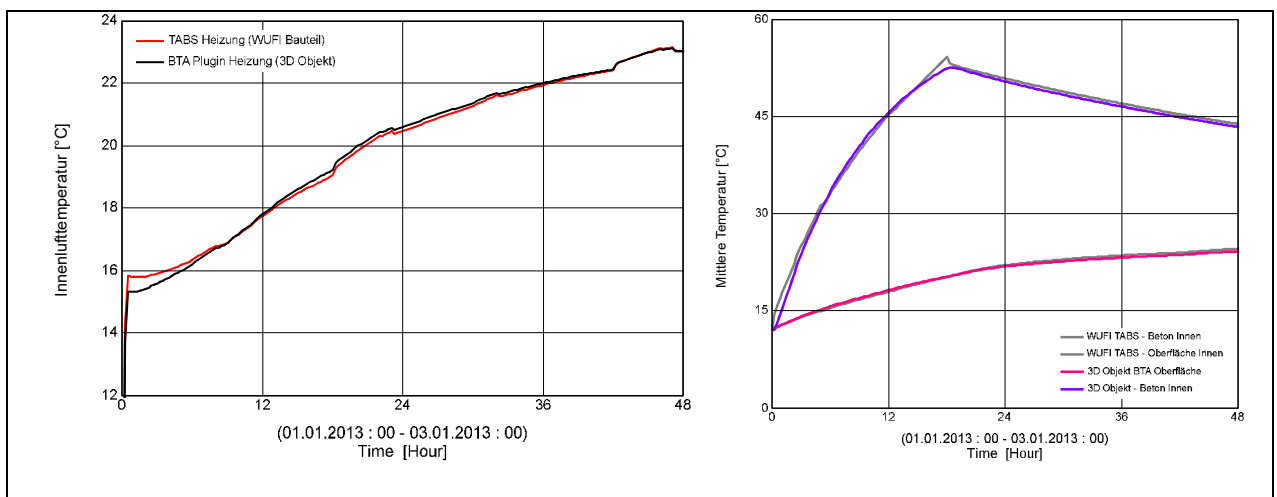


Bild 28:
Links: Innenluft-Temperaturverlauf der Validierungssimulation im Vergleich zwischen altem Model (TABS Heizung) im eindimensionalen betrachteten Bauteil, im Vergleich mit der Innenlufttemperatur im neuen dreidimensionalen Bauteilmodell (BTA Plugin Heizung).
Rechts: Bauteiltemperaturverläufe der Decke in der Schicht des BTA-Rohrs und an der Bauteiloberfläche.

Durchführung der Simulationsstudie der Neubau-Deckenvarianten

Mit dieser Simulationsstudie sollen die in Tabelle 1 (Abschnitt 2.2.1) dargestellten unterschiedlichen Neubau-Deckenvarianten in ihrem Verhalten abgebildet werden, in erster Linie der Einfluss der in der Deckenkonstruktion liegenden Dämmstreifen. Es wird ein Raum in einem Gebäude mit der jeweiligen Deckenvariante als oberer und unterer Raumabschluss betrachtet. Der simulierte Zeitraum beträgt zwei Wochen, mit zwei unterschiedlichen Randbedingungen. So wird jede Variante mit einer sehr kalten Außenlufttemperatur und wenig solaren Wärmeeinträgen betrachtet. Diese Witterung dient zur Untersuchung der Speicherfähigkeit der Deckentypen und der Regelbarkeit der passiven Entladung. Des Weiteren wird jede Variante unter dynamischeren Witterungsbedingungen zur Untersuchung der Überhitzung bzw. der Auswirkungen der aktiven Entladung, mit stark fluktuierenden Außenlufttemperaturen und klarem Himmel und demnach höheren solaren Wärmeeinträgen beaufschlagt.

Die Beladung der Decken wird jeweils beim Start der Simulation aktiviert. Zur Vergleichbarkeit der Deckentypen wird die Beladung in jedem Fall nach dem Erreichen einer Innenlufttemperatur von 22 °C abgeschaltet, eine Regelung der Rücklauftemperaturen wird nicht betrachtet. Eine weitere Beladung findet nicht statt, auch nicht nach Abfallen der Raumlufttemperatur unter die Soll-Temperatur von 21 °C. Nach der einmaligen Beladung wird das Abklingverhalten der Raumluft- und Bauteiltemperaturen betrachtet.

Die gewählten Randbedingungen für das Raummodell (Bild 27) zur Simulationsstudie und zur Modellvalidierung sind im Folgenden beschrieben.

Geometrie:

Es wird die Geometrie des Wohnzimmers der Zwillingshäuser mit einer Fläche von 33,6 m² angenommen. Abgeschlossen wird das Raummodell mit Außenwänden nach Westen und Süden und Innenwänden nach Osten und Norden. Auf der Westseite befindet sich ein Fenster mit dem Öffnungsmaß 1,14 m², in der Außenwand nach Süden eine Fenstertüre mit 2,85 m² und ein Panoramafenster mit 5,81 m² Öffnungsmaß.

Lüftung:

Der Infiltrations-Luftwechsel wurde festgelegt auf 0,042 1/h (n₅₀ = 0,6 1/h). Die mechanische Lüftung mit 90 Prozent Wärmerückgewinnung soll für 0,3-fachen Luftwechsel in der Stunde sorgen.

Bauteile:

Der Wärmedurchgangskoeffizient (U-Wert) der gewählten Außenwand als Wärmedämmverbundsystem ist 0,148 W/(m²K), bestehend aus 25 cm Mineralschaum Dämmung mit einer Wärmeleitfähigkeit von 0,04 W/(mK); 24 cm Kalksandstein mit der Rohdichte 1900 kg/m³ und einer Wärmeleitfähigkeit von 1,0 W/(mK).

Die Fenster haben einen U_w-Wert von 0,8 W/m²K und einen g-Wert = 0,55 (85 Prozent nicht senkrechter Strahlungseinfall, 0,7 Rahmenreduktionsfaktor,

80 Prozent ständige Verschattung, 13 cm Fensterlaibung).

Die Innenwände (begrenzend zu einem Raum mit gleichem Innenklima) bestehen aus 24 cm Kalksandstein mit der Rohdichte 1900 kg/m^3 .

Die Decken/Böden (begrenzend zu einem Raum mit gleichem Innenklima) sind entsprechend Tabelle 1 aufgebaut, je nach gewählter Deckenvariante.

Innere Lasten:

Die inneren Wärmelasten wurden konstant mit $2,1 \text{ W/m}^2$ angesetzt

BTA-System:

Das BTA-Rohr im Bauteil ist mit einem Rohrrinnendurchmesser von 2 cm, bei einem Verlegeabstand von 15 cm berücksichtigt. Die Fläche ist in 2 Heizkreise mit einem maximalen Durchfluss $0,05 \text{ kg/s}$ (3 l/min) je Kreis geteilt.

Außenklima:

Das angesetzte Außenklima im Bild 29 aufgetragen. Das Szenario spiegelt eine bewölkte Woche, mit fallenden Außenlufttemperaturen und sehr wenig solaren Wärmeerträgen wieder. Entsprechend dient es zur kritischen Betrachtung der Speicherfähigkeit bzw. des Wärmerückhaltevermögens der Deckenvarianten.

Das Raummodell wurde mit idealer Anlagentechnik simuliert (ohne Windheizungs-Neubaudecke zum Einhalten einer Mindest-Solltemperatur von $21 \text{ }^\circ\text{C}$). Ist Summe liegt der Wärmebedarf damit bei 132 kWh . Das ist die minimale Wärmemenge, welche zu Beginn nach Beladung in der Decke eingespeichert sein sollte, um über die beiden betrachteten Wochen ohne Reststrom auszukommen.

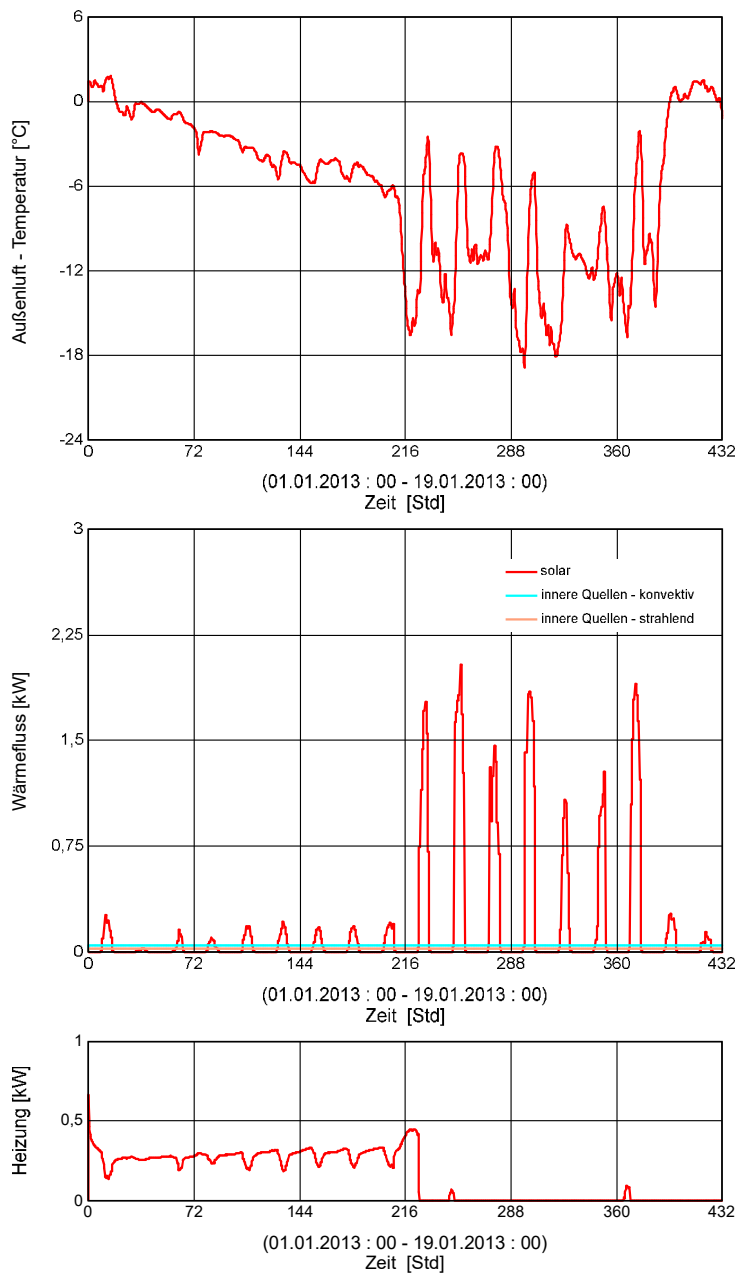


Bild 29:
 Wetterbedingungen zur Untersuchung der Speicherfähigkeit.
 Oben: Außenlufttemperatur.
 Mitte: Solare Wärmegewinne und interne Wärmequellen.
 Unten: Idealer Heizwärmebedarf für eine Soll-Raumlufttemperatur von 21 °C.

Ein wesentlicher Faktor für die Funktion der BTA-Speicher ist die thermische Entkoppelung zwischen der aktivierten Bauteilmasse und dem Raum. Analog zu den Berechnungen bezüglich der vier Neubau-Deckentypen werden alle vier betrachteten BTA-Speicher-Typen (Decke/Wand, Neubau/Sanierung) mit unterschiedlichen Dämmstärken rechnerisch untersucht (rechnerische Wärmeleitfähigkeit der Dämmschicht: $\lambda=0,035$ W/m). Die resultierenden Verläufe der Raumlufttemperaturen, aus denen Überbrückungszeiten abgeleitet werden können, sind in Bild 30 dargestellt und in Tabelle 5 zusammengefasst. Die Wirkung einer Dämmschicht ist allerdings sowohl durch die in Abschnitt 2.2.2 beschriebene umlaufende Wärmebrücke der Bauteileinbindung als auch durch den Verlust an Wohnfläche (Wanddicke) bzw. Raumhöhe (Decken) begrenzt. In den dargestellten Simulationen ist eine 2-seitige Bauteileinbindung berücksichtigt. Die Wirkung einer Dämmschicht ist des Weiteren abhängig von Systemeinstellungen wie Vorlauftemperatur und Durchflussmenge, aber auch von weiteren Konstruktionsdetails wie Rohrabstand und Bauteildicke. Des Weiteren beruhen die in diesem Abschnitt gewonnenen Erkenntnisse auf ausgewählten Klimadaten am Standort Holzkirchen, dem gewählten Klimadatensatz mit bewölktem Himmel und geringem solaren Wärmeeintrag. Absolutwerte ändern sich, je nach Gebäudestandort und Klimaverhältnissen, ein Vergleich der Unterschiede zwischen den Varianten lässt sich jedoch darstellen. Aus diesen Gründen sind die dargestellten energetischen Simulationen keine alleinige Grundlage zur Festlegung der Dämmstoffstärken. Im Hinblick auf die Vorversuche im Technikum bzw. in den Zwillingshäusern des Fraunhofer IBP Holzkirchen wird für die Neubau-Decke eine Dämmstärke von 4 cm und der Typ 4 festgelegt. Für die anderen 4 BTA-Speicher werden 3 cm gewählt, allerdings wird hier das Material Calostat (Evonic) mit einer Wärmeleitfähigkeit von 0,019 W/m eingesetzt. Bezogen auf die Wärmeleitfähigkeit des in den Simulationsrechnungen angesetzten Dämmmaterials entspricht dies einer Dämmstoffdicke von 5,5 cm.

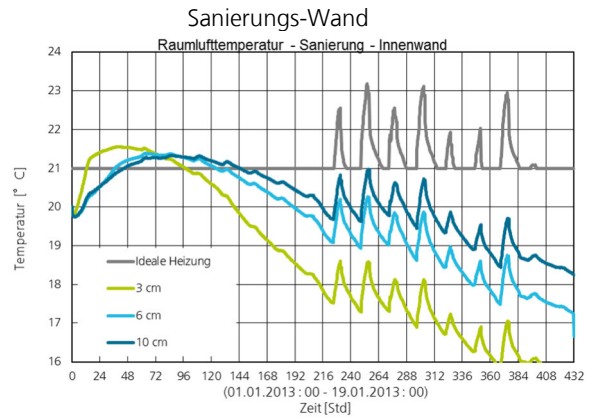
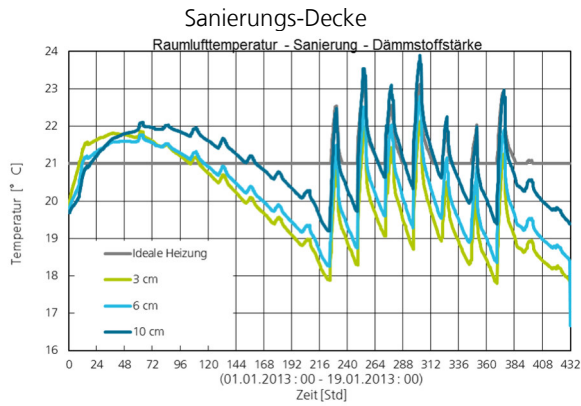
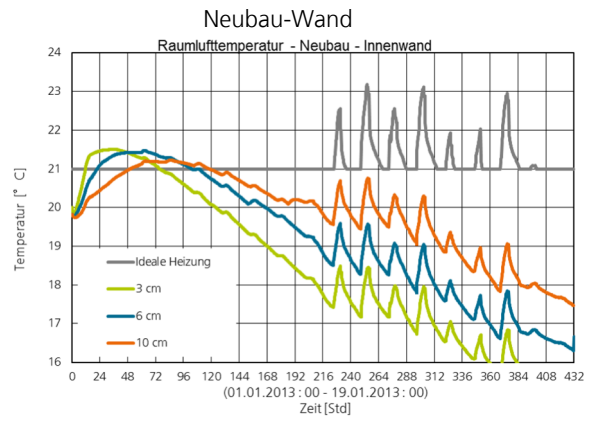
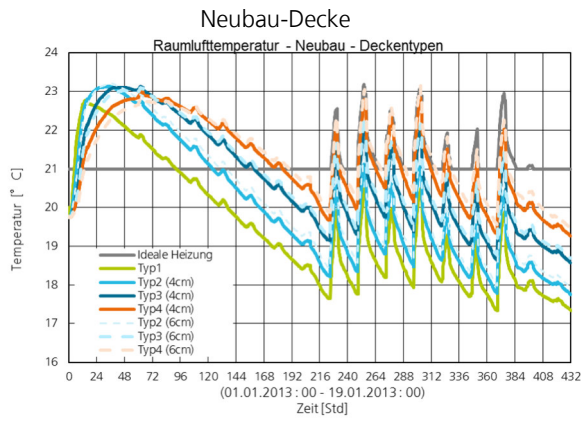


Bild 30:
Verläufe der Raumlufttemperaturen in Abhängigkeit der Dämmstoffstärke zur thermischen Entkoppelung für die vier betrachteten BTA-Speicher-Typen.

Tabelle 5:
Überbrückungszeiten verschiedener BTA-Systeme und Dämmstärken.

| | | | | Überbrückungszeit bis Raumtemperatur: | | | | | |
|---------------------|-----------|----------------|------------|--|-------|-------|-------|-----------------------------|--------------------------------|
| | Deckentyp | Dämmstoffdicke | Beladezeit | 22 °C | 21 °C | 20 °C | 19 °C | Max. Raumtempera- tur | Max. Bauteiltempera- tur |
| | | | [h] | [h] | [h] | [h] | [h] | [°C] | [°C] |
| Neubaudecken | 1 | - | 4,8 | 47 | 88 | 132 | 170 | 22,8 | 36,9 |
| | 2 | 4 cm | 7,0 | 81 | 117 | 158 | 202 | 23,1 | 39,3 |
| | 2 | 6 cm | 7,8 | 87 | 129 | 164 | 205 | 23,2 | 39,7 |
| | 3 | 4 cm | 9,8 | 106 | 150 | 188 | 352 | 23,1 | 39,9 |
| | 3 | 6 cm | 10,5 | 109 | 152 | 198 | 354 | 23,1 | 40,2 |
| | 4 | 4 cm | 11,3 | 126 | 173 | 205 | 421 | 23,0 | 40,6 |
| | 4 | 6 cm | 13,3 | 127 | 177 | 420 | 419 | 23,1 | 41,3 |
| Decken Sanierung | | 3 cm | 9,0 | - | 96 | 141 | 186 | 22,1 | 39,0 |
| | | 6 cm | 11,5 | - | 106 | 156 | 200 | 22,8 | 40,5 |
| | | 10 cm | 18,8 | 5 | 143 | 192 | 413 | 23,9 | 42,1 |
| Wand Neubau | | 3 cm | 11,5 | - | 64 | 113 | 156 | 21,5 | 38,8 |
| | | 6 cm | 21,5 | - | 81 | 145 | 191 | 21,5 | 41,7 |
| | | 10 cm | 48,3 | - | 69 | 164 | 269 | 21,5 | 43,6 |
| Wand Sanierung | | 3 cm | 12,8 | - | 85 | 127 | 160 | 21,5 | 37,7 |
| | | 6 cm | 37,3 | - | 87 | 154 | 209 | 21,4 | 39,2 |
| | | 10 cm | 44,8 | - | 100 | 171 | 297 | 21,3 | 44,0 |

2.2.4 Simulation zur Festlegung der Wärmeleitprofile der BTA-Sanierungs-Varianten

In Bild 31 ist der simulierte Verlauf der Beladegeschwindigkeit für eine Bestands-Betondecke für vier unterschiedliche Rasterabstände zwischen den Belade-Profilen dargestellt. Innerhalb der ersten 12 Stunden ist kein Unterschied zwischen dem 20 cm und dem 40 cm Abstand zu erkennen, während die Abstände von 60 cm bzw. 80 cm von Anfang an einen geringeren Temperaturanstieg und somit eine geringere Beladegeschwindigkeit zeigen. Da die maximale

Beladedauer voraussichtlich 9 Stunden betragen wird, ist der Unterschied zwischen 20 cm und 40 cm Abstand irrelevant. Aus diesem Grund wird unter wirtschaftlichen Aspekten ein Rasterabstand von 40 cm gewählt. Die entsprechende Untersuchung für die schwere Kalksandstein-Bestandswand in Bild 32 zeigt ein identisches Ergebnis.

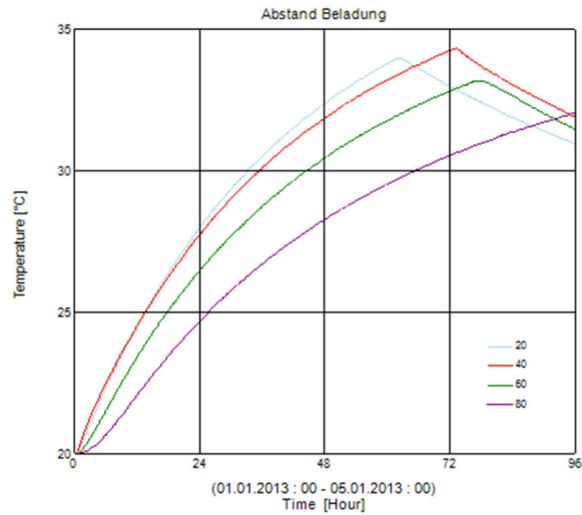


Bild 31:

Verlauf der mittleren Temperatur des BTA-Speichers während der Beladung für Rasterabstände der Aluminiumprofile von 20 cm, 40 cm, 60 cm und 80 cm an einer Bestands-Betondecke.

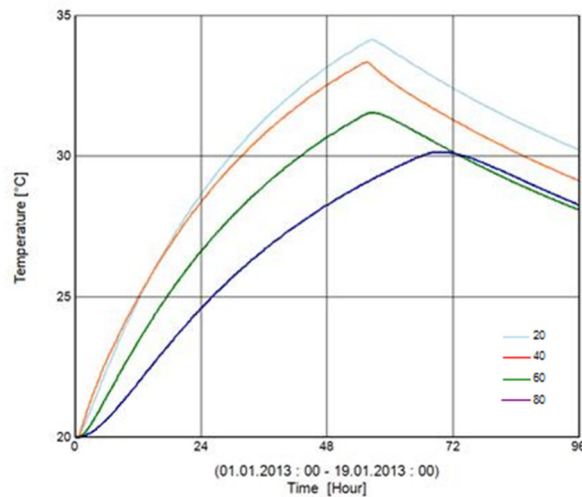


Bild 32:

Verlauf der mittleren Temperatur des BTA-Speichers während der Beladung für Rasterabstände der Aluminiumprofile von 20 cm, 40 cm, 60 cm und 80 cm an einer schweren Kalksandstein-Bestandswand.

2.2.5 Einbindung der BTA-Speicher in die technische Gebäudeausrüstung

Die Einbindung der BTA-Speicher in ein Gesamtkonzept der technischen Gebäudeausrüstung (TGA) dient der Beladung der BTAs während Starkwindzeiten, der Regelung und Verteilung der aktiven Entladung der BTAs und der effizienten Bereitstellung von Trinkwarmwasser (TWW).

Nach Betrachtung zahlreicher Varianten ist in Bild 33 der favorisierte Stand des Hydraulikkonzepts für die BTA-Variante der Windheizung 2.0 dargestellt. Hier dient die BTA-Hydraulik nicht nur zur Verteilung der Heizwärme, sondern ebenso als Primärseite für eine Rücklauf-Wärmepumpe zur TWW-Bereitung. Die für den Versuch beschaffte Rücklaufwärmepumpe HWBW-K des Herstellers HAUTEC verfügt laut Datenblättern über eine Arbeitszahl von 3,4. Hierdurch reduziert sich der Strombedarf für die TWW-Bereitung um 77 %, verglichen mit einer TWW-Bereitung mit direkt elektrischer Erwärmung. Da es aus ökonomischer Sicht nicht sinnvoll erscheint, zusätzlich zum BTA-Speicher einen für 2 Wochen ausgelegten Warmwasserspeicher vorzusehen, kann abschätzend angenommen werden, dass die TWW-Bereitung kontinuierlich und damit zu 97 % der Zeit mit Reststrom bereitet wird (während ca. 3 % des Jahres treten Überschussstrombedingungen im Netz auf). Das für die Versuche in den Zwillingshäusern angesetzte, in Abschnitt 2.5.2 beschriebene, Zapfprofil hat einen Wärmebedarf von 3,86 kWh/d bzw. 1408 kWh/a. Dies resultiert einer Abschätzung der Reststrom-Reduktion um 994 kWh/a durch den Einsatz der Wärmepumpe mit einem Wirkungsgrad von 3,4.

Über den durch die Wärmepumpe erwärmten Warmwasser-Speicher kann die raumseitige Flächenheizungen bei entladener BTA nachgeheizt werden. Als primärseitige Wärmequelle für die Wärmepumpe dient hierbei der überdämmte Kern der BTA, was zu einer entsprechenden Unterkühlung führt. Da die BTA auf Grund des Tauwasserrisikos nur begrenzt unterkühlt werden kann, ist die Nachheiz-Kapazität über die Wärmepumpe begrenzt. Wenn die Kapazität der BTA erschöpft ist, muss ergänzend mit Reststrom nachgeheizt werden.

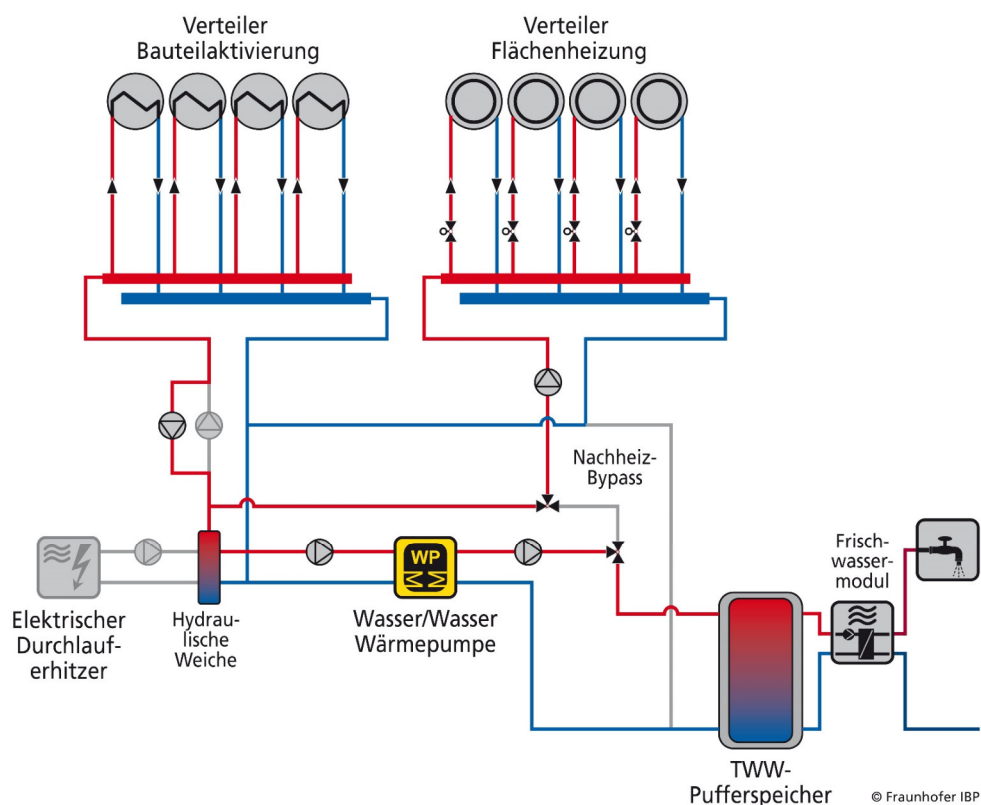


Bild 33:
Favorisiertes System zur Trinkwarmwasserbereitung für Windheizung 2.0-BTA-Speicher. Im hier dargestellten Betriebsmodus werden die Flächenheizungen aus der BTA nachgeheizt und TWW mit der Wärmepumpe bereitete.

2.2.6 BTA-Detail-Simulationsmodell

Das BTA-Detail-Simulationsmodell ist wie das in 0 beschriebene BTA-Simulationsmodell erweitert zu einem gesamten System, mit weiteren Teilmodellen wie beim HTSS Modell beschrieben in 2.1.7. Ebenfalls kommt auch für das BTA – Detailsimulationsmodell WUFI® Plus [4] als Gebäudesimulationsmodell zum Einsatz. Mit dem drei-, bzw. zweidimensionalen thermischen Bauteilmodell [5] werden die aktivierten Decken und Wände abgebildet und über das Plug-In die Anlagentechnik [8] mit Wasserfall-Berechnungsalgorithmus angekoppelt.

Für die Modellierung der Rohrschlangen in den massiven Bauteilen kommt dasselbe Modell zum Einsatz wie für die Luftkanäle des HTSS; mit angepassten Fluideigenschaften. Der Unterschied zum HTSS-Luftkanal ist, dass hier Wasser das Transportmedium ist, entsprechend sind spezifische Wärmekapazität und Dichte angepasst. Die Neubau-Deckenstudie wurde zum Projektbeginn noch mit nur zwei direkt aneinander gekoppelten TABS-Modellen berechnet. Zur Abbildung gesamter Gebäude wurde das Modell mit Ein- und Ausgangsports zur flexiblen Systemkonfiguration erweitert. Weitere Teilmodelle, wie Verteiler, Sammler und Ventile kommen ebenfalls für das BTA-Modell zum Einsatz. Ergänzend sind Teilmodelle für die Durchlauferhitzer, Wärmepumpe und Trinkwarmwasser-Pufferspeicher hinzugefügt.

Wärmepumpe

Auf Grund der geringeren Speichertemperatur ist für die Trinkwarmwasserbereitung beim BTA-System eine Wärmepumpe notwendig, welche auf der Primärseite die Speichertemperatur auf Trinkwarmwasser-Solltemperatur hebt. Wie beim Trinkwarmwasser Wärmetauscher beim HTSS-System ist der benötigte Wärmebedarf bekannt (Gleichung (2)). Vereinfacht wird mit der Jahresarbeitszahl wird damit der Anteil der benötigten Wärme aus dem Speicher \dot{Q}_p und der Bedarf der Wärmepumpe \dot{Q}_{el} ermittelt (Gleichung (7)). Die maximal auf der Primärseite zu Verfügung stehende Temperaturdifferenz $\Delta\vartheta_p$ wird berechnet (Gleichung (8)) mit der Eintrittstemperatur $\vartheta_{p,E}$ und der minimal akzeptierten Austrittstemperatur $\vartheta_{\min p,A}$, auf der Primärseite, um die Bauteile nicht zu weit unterkühlen. Die den Bedarf deckende Temperaturdifferenz $\Delta\vartheta_{soll}$ wird berechnet (Gleichung (9)) mit der Wärme aus dem Speicher und dem Massenstrom auf der Primärseite \dot{m}_p der Wärmepumpe.

$$\dot{Q}_p = \dot{Q}_{TWW} * JAZ \quad ; \quad \dot{Q}_{el} = \dot{Q}_{TWW} - \dot{Q}_p \quad (7)$$

$$\Delta\vartheta_p = \vartheta_{p,E} - \vartheta_{\min p,A} \quad (8)$$

$$\Delta\vartheta_{soll} = \frac{\dot{Q}_p}{\dot{m}_p * c_{pWasser}} \quad (9)$$

Ist die Soll-Temperaturdifferenz kleiner als die zu Verfügung stehende Temperaturdifferenz ($\Delta\vartheta_{soll} < \Delta\vartheta_p$), dann reicht die Wärmemenge des Speichers aus. Die tatsächliche Rücklauftemperatur ergibt sich nach Gleichung (10).

$$\vartheta_{p,A} = \vartheta_{p,E} - \Delta\vartheta_{soll} \quad (10)$$

Reicht die Wärmemenge aus dem Speicher nicht mehr aus um den Bedarf zu decken, dann wird der Pufferspeicher direkt-elektrisch auf Trinkwarmwasser-Solltemperatur nachgeheizt.

Pufferspeicher

Für den Pufferspeicher wird das Modell des Schichtenspeichers aus [8] eingesetzt. Das Modell zur Simulation von thermischen Speichern verwendet bis zu zwei innenliegenden Wärmetauschern zur indirekten Be- und Entladung. Die Wärmetauscher sind mit konstanten Wärmeübergangskoeffizienten berücksichtigt und sind in ihren Anschlusshöhen und damit dem direkt beeinflussten Bereich im Speicher anpassbar. Das im Wärmetauscher befindliche Medium hat konstante Eigenschaften und ist vereinfacht masselos, berücksichtigt somit keine Trägheit. Außerdem sind zwei Double Ports vorhanden zur direkten Be- und Entladung, hier kann der Anschluss der Zapfung in seiner Höhe beeinflusst werden. Im Speichermodell sind drei Temperaturfühler integriert, welche in ihrer Montagehöhe einstellbar sind. Es ist ein Schichtenspeicher mit beliebig vielen diskretisierten Temperaturschichten, welche in horizontaler Ebene isotherm sind. Als Standardwert sind 5 Schichten eingestellt. Die Modellierung des Speichers beinhaltet Wärmeströme zwischen benachbarten Schichten auf Grund von Massebewegungen sowie auf Grund von Wärmeleitvorgängen im Fluid, entlang der Speicherwand und der Speichereinbauten.

Validierung

An den beiden Deckensystemen, Neubaudecke und Sanierungsdecke, sowie zwei Wandsystemen, der Neubauwand und Sanierungswand, wurden diverse Musterabläufe bzw. Betriebsabläufe (siehe Abschnitt 2.4.4) untersucht. Zur Validierung wurden hauptsächlich die volle Speicherbeladung auf 100 Prozent mit anschließender passiver Entladung, die volle Speicherbeladung mit anschließender aktiver Entladung, die volle Beladung mit anschließender alternierender Entladung sowie der Nachheizbetrieb über die aktive Entladung herangezogen.

Zum Testen, bzw. Validieren der Simulationsmodelle werden die durchgeführten Vorversuche, beschrieben in Abschnitt 2.4.4, mit der Simulation nachgebildet. Dabei werden sämtliche Randbedingungen der Messungen auch als Randbedingungen im Simulationsmodell angesetzt. Dies sind unter anderem die angrenzenden Lufttemperaturen und die Oberflächentemperaturen umliegender Bauteile. Der Wärmeerzeuger wird bei der Bauteil-Validierung nicht abgebildet. Somit sind die Vorlauftemperatur beim Beladevorgang und beim Nachheizen aus den Messdaten entnommen angesetzt. Der Massenstrom wird als Randbedingung angesetzt. Berechnet werden alle Temperaturen in und am BTA-Bauteilsystem, also auch Temperaturen in den BTA-Rohren, an deren Vorlauf und Rücklauf.

Es werden somit Messwerte der Versuche den berechneten Werten der Simulationen gegenübergestellt. Dies sind hauptsächlich folgende Größen:

- Lade RLT: Rücklauftemperatur BTA (Bauteilspeicher)
- Entlade VLT: Vorlauftemperatur Flächenheizung (Übergabesystem; bei Entladung des BTA-Speichers)
- Entlade RLT: Rücklauftemperatur Flächenheizung (Übergabesystem)
- Oberflächentemperatur (OFT) Unten: Temperatur-Messpunkt an der Oberseite des Deckenbauteils
- Oberflächentemperatur (OFT) Oben: Temperatur-Messpunkt an der Unterseite des Deckenbauteils
- Bauteil-Kerntemperatur (KT): Mittlere Bauteiltemperatur, der „Speicherschicht“ bzw. Betondecke

Neben der graphischen Gegenüberstellung, werden folgende statistische Indizes zur Validierung der Simulationsmodelle betrachtet:

NMBE – „Normalized mean bias error“:

Stellt die durchschnittliche Abweichung zwischen den Mess- und Simulationsergebnissen dar.

Toleranzbereich + / - 10 Prozent

CV(RMSE) – „Coefficient of Variation of the Root Mean Square Error“:

zeigt die Schwankungen zwischen Simulations- und Messwerten.

Toleranzbereich +/- 30 Prozent

R² - Bestimmtheitsmaß:

zeigt wie nah die simulierten Werte an den Werten einer Regressionsgerade der Messwerte liegen.

Toleranzbereich > 0,75

Die angewendeten Toleranzbereiche sind festgelegt nach ASHRAE (2014, 20), „M&V Guidelines: Measurement and Verification for Federal Energy Projects (2015) [9].

Das Simulationsmodell der Neubaudecke folgt dem Vorversuch de BTA-Speichers aus Abschnitt 2.4.2. Bild 34 zeigt exemplarisch das System im Querschnitt mit den jeweiligen Schichten. Man erkennt in der Mitte in Grau die massive Betondecke mit der angedeuteten Lage des BTA-Speichers (rote Linie). Darunter nach der Zwischen-Dämmebene liegt die aktive Entladung (rote Linie) in der abgehängten Decke. Darunter befindet sich in Gelb die Zone, bzw. der Luftraum zwischen den beiden aufgestellten Containern. Über dem Modell, in Orange liegt der mit Planen beschränkte Luftraum über dem Bauteil.

Bild 35 zeigt die gemessene und simulierte, bzw. berechnete Vorlauftemperatur des BTA-Speichers. Nach der Beladung mit etwa 54 °C über 9 Stunden folgt in dem gezeigten Fall die alternierende aktive Entladung. Dabei wird jeweils nach 12 Stunden die aktive Entladung, also die Pumpe, die das Wasser zwischen

dem BTA-Speicher und der aktiven Entladung fördert, aus- bzw. angeschaltet. Bei der Beladung (mit etwa 54 °C) ist die Vorlauftemperatur als Randbedingung vorgegeben, nach der Beladung wird nur noch der Massenstrom im Bauteil als Randbedingung angesetzt, die Temperaturen sind berechnet. Folgend sind die Temperaturen vom Rücklauf des BTA-Speichers (Bild 36), der Oberfläche an Bauteil-Unterseite (Bild 37) und -Oberseite (Bild 38) sowie gemittelt im Bauteilkern (Bild 39) gegenübergestellt abgebildet. Die Verläufe zeigen eine gute Übereinstimmung. Die zuvor beschriebenen statistischen Indizes der betrachteten Betriebszustände für die Neubaudecke sind in Tabelle 6 ausgewertet.

Auf Bild 40, Bild 41 und Bild 42 sind exemplarisch die jeweiligen Simulations-Teilmodelle und in den Tabelle 7, Tabelle 8 und Tabelle 9 die berechneten statistischen Indizes der Sanierungsdecke, Neubauwand und Sanierungswand abgebildet.

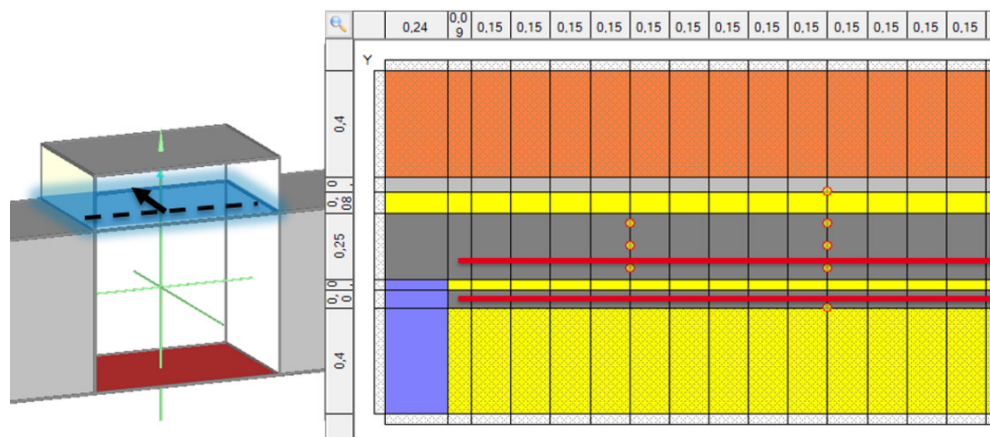


Bild 34:
Teilmodell Neubaudecke.

Tabelle 6:
 Validierung der Temperaturen Neubaudecken-Teilmodell.
 VLT: Vorlauftemperatur; RLT: Rücklauftemperatur;
 OFT: Oberflächentemperatur.

| Versuch: 100 % Beladung, aktive Entladung | | | | | | | |
|---|----------|----------|-------------|-------------|-----------|----------|---------|
| | Lade VLT | Lade RLT | Entlade VLT | Entlade RLT | OFT Unten | OFT Oben | Bauteil |
| NMBE | 1 % | 1 % | 1 % | 0 % | 0 % | 1 % | 1 % |
| CV(RMSE) | 2 % | 3 % | 2 % | 1 % | 1 % | 2 % | 1 % |
| R ² | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 1,00 | 1,00 | 0,98 | 1,00 |

| Versuch: 100 % Beladung, alternierende Entladung | | | | | | | |
|--|----------|----------|-------------|-------------|-----------|----------|---------|
| | Lade VLT | Lade RLT | Entlade VLT | Entlade RLT | OFT Unten | OFT Oben | Bauteil |
| NMBE | -1 % | 1 % | 0 % | 1 % | 0 % | 1 % | 2 % |
| CV(RMSE) | 2 % | 2 % | 2 % | 2 % | 1 % | 2 % | 2 % |
| R ² | 0,99 | 1,00 | 0,97 | 0,96 | 1,00 | 0,98 | 0,99 |

| Versuch: 100 % Beladung, passive Entladung | | | | | | | |
|--|----------|----------|-------------|-------------|-----------|----------|---------|
| | Lade VLT | Lade RLT | Entlade VLT | Entlade RLT | OFT Unten | OFT Oben | Bauteil |
| NMBE | -2 % | -1 % | -2 % | -2 % | -2 % | 0 % | -1 % |
| CV(RMSE) | 2 % | 2 % | 2 % | 2 % | 2 % | 1 % | 3 % |
| R ² | 0,99 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 0,99 | 0,97 |

| Versuch: Nachheizen | | | | | | | |
|---------------------|----------|----------|-------------|-------------|-----------|----------|---------|
| | Lade VLT | Lade RLT | Entlade VLT | Entlade RLT | OFT Unten | OFT Oben | Bauteil |
| NMBE | | | | | -2 % | 0 % | -1 % |
| CV(RMSE) | | | | | 2 % | 1 % | 3 % |
| R ² | | | | | 1,00 | 0,99 | 0,97 |

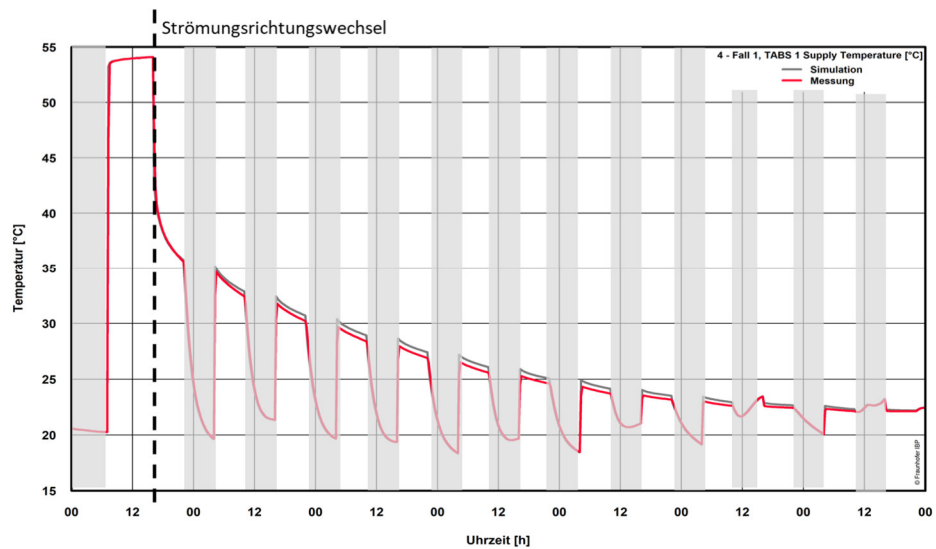


Bild 35:
Gegenüberstellung der Vorlauftemperatur der Belade-BTA in der Betondecke. Nach der vollen Beladung auf 100 % folgt die alternierende Entladung. Grau markierte Bereiche zeigen das „ausgeschaltete“ System, bzw. ausgeschaltete Pumpen. Die rote Linie zeigt hierbei den Messwert, die graue Linie die Simulationsergebnisse.

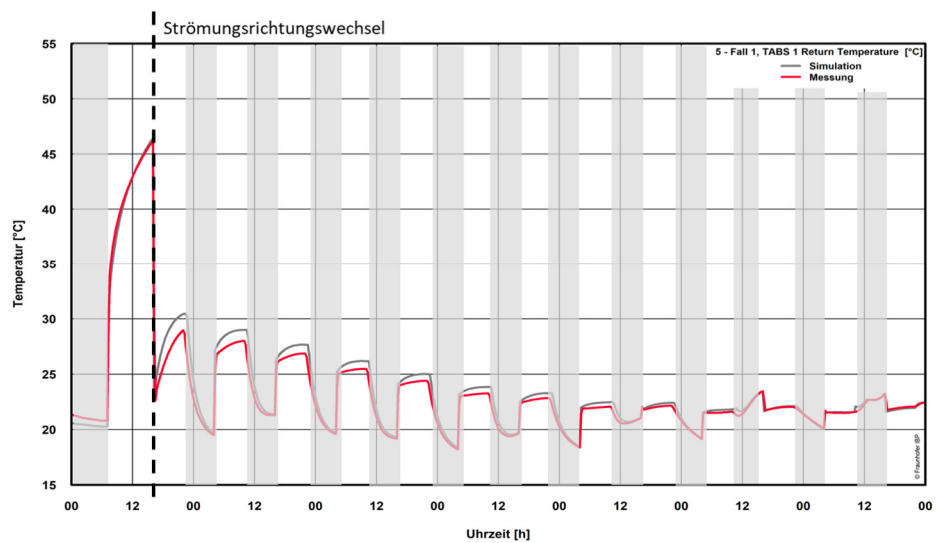


Bild 36:
Gegenüberstellung der Rücklauftemperatur der Belade-BTA in der Betondecke. Nach der vollen Beladung auf 100 % folgt die alternierende Entladung. Grau markierte Bereiche zeigen das „ausgeschaltete“ System, bzw. ausgeschaltete Pumpen. Die rote Linie zeigt hierbei den Messwert, die graue Linie die Simulationsergebnisse.

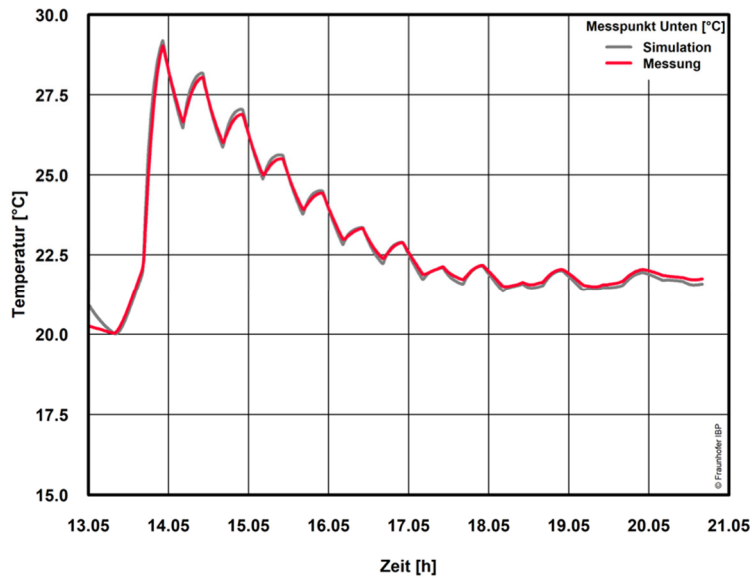


Bild 37:
Gegenüberstellung der gemessenen (rote Linie) und simulierten (graue Linie) Oberflächentemperatur an der Bauteilunterseite.

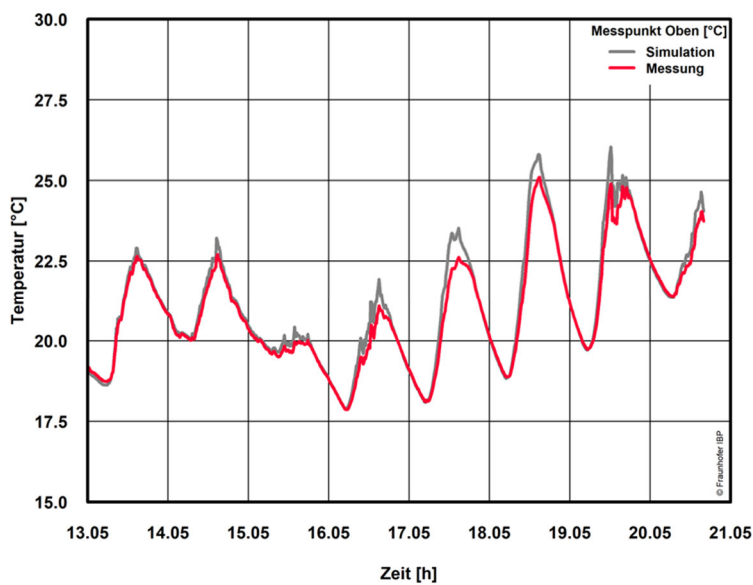


Bild 38:
Gegenüberstellung der gemessenen (rote Linie) und simulierten (graue Linie) Oberflächentemperatur an der Bauteiloberseite.

Tabelle 7:
Validierung der Temperaturen Sanierungsdecke-Teilmodell.

| Versuch: 100 % Beladung, aktive Entladung | | | | | | | |
|---|----------|----------|-------------|-------------|-----------|----------|---------|
| | Lade VLT | Lade RLT | Entlade VLT | Entlade RLT | OFT Unten | OFT Oben | Bauteil |
| NMBE | 6 % | 5 % | 6 % | 6 % | -2 % | 1 % | 2 % |
| CV(RMSE) | 9 % | 7 % | 7 % | 7 % | 4 % | 1 % | 5 % |
| R ² | 0,89 | 0,97 | 0,97 | 0,81 | 0,88 | 0,94 | 0,91 |

| Versuch: 100 % Beladung, alternierende Entladung | | | | | | | |
|--|----------|----------|-------------|-------------|-----------|----------|---------|
| | Lade VLT | Lade RLT | Entlade VLT | Entlade RLT | OFT Unten | OFT Oben | Bauteil |
| NMBE | 5 % | 3 % | 5 % | 4 % | 0 % | 1 % | 2 % |
| CV(RMSE) | 8 % | 6 % | 7 % | 6 % | 1 % | 2 % | 4 % |
| R ² | 0,94 | 0,98 | 0,95 | 0,93 | 0,99 | 0,99 | 0,97 |

| Versuch: 100 % Beladung, passive Entladung | | | | | | | |
|--|----------|----------|-------------|-------------|-----------|----------|---------|
| | Lade VLT | Lade RLT | Entlade VLT | Entlade RLT | OFT Unten | OFT Oben | Bauteil |
| NMBE | | -3 % | | | -1 % | 0 % | 1 % |
| CV(RMSE) | | 5 % | | | 2 % | 1 % | 2 % |
| R ² | | 0,98 | | | 0,97 | 0,97 | 0,99 |

| Versuch: Nachheizen | | | | | | | |
|---------------------|----------|----------|-------------|-------------|-----------|----------|---------|
| | Lade VLT | Lade RLT | Entlade VLT | Entlade RLT | OFT Unten | OFT Oben | Bauteil |
| NMBE | | | | | -1 % | 0 % | 1 % |
| CV(RMSE) | | | | | 2 % | 1 % | 2 % |
| R ² | | | | | 0,97 | 0,97 | 0,99 |

Neubauwand

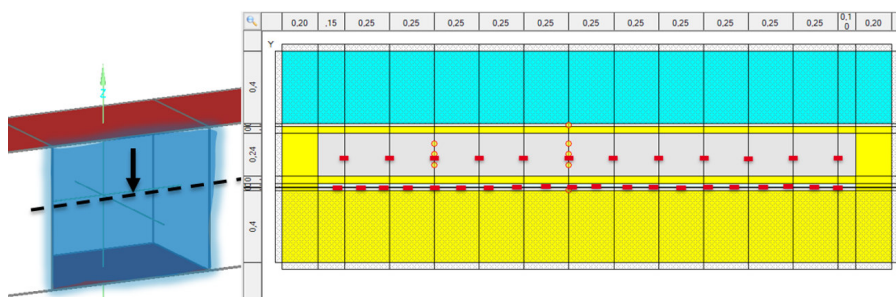


Bild 41:
Teilmodell Neubauwand.

Tabelle 8:
Validierung der Temperaturen Neubauwand-Teilmodell.

| 100 % Beladung, aktive Entladung | | | | | | | |
|----------------------------------|----------|----------|-------------|-------------|-----------|-----------|---------|
| | Lade VLT | Lade RLT | Entlade VLT | Entlade RLT | OFT außen | OFT innen | Bauteil |
| NMBE | -4 % | 1 % | 1 % | 0 % | -2 % | -1 % | 1 % |
| CV(RMSE) | 7 % | 2 % | 2 % | 2 % | 3 % | 1 % | 2 % |
| R ² | 0,90 | 0,99 | 0,97 | 0,96 | 0,91 | 0,99 | 1,00 |

| 100 % Beladung, alternierende Entladung | | | | | | | |
|---|----------|----------|-------------|-------------|-----------|-----------|---------|
| | Lade VLT | Lade RLT | Entlade VLT | Entlade RLT | OFT außen | OFT innen | Bauteil |
| NMBE | -2 % | 1 % | 1 % | 0 % | 1 % | 0 % | 1 % |
| CV(RMSE) | 5 % | 3 % | 3 % | 2 % | 1 % | 1 % | 1 % |
| R ² | 0,88 | 0,99 | 0,94 | 0,85 | 0,98 | 0,94 | 1,00 |

| 100 % Beladung, passive Entladung | | | | | | | |
|-----------------------------------|----------|----------|-------------|-------------|-----------|-----------|---------|
| | Lade VLT | Lade RLT | Entlade VLT | Entlade RLT | OFT außen | OFT innen | Bauteil |
| NMBE | | -1 % | | | -2 % | -1 % | 1 % |
| CV(RMSE) | | 1 % | | | 3 % | 1 % | 2 % |
| R ² | | 0,73 | | | 0,91 | 0,99 | 1,00 |

| Nachheizen | | | | | | | |
|----------------|----------|----------|-------------|-------------|-----------|-----------|---------|
| | Lade VLT | Lade RLT | Entlade VLT | Entlade RLT | OFT außen | OFT innen | Bauteil |
| NMBE | | | | | 1 % | -3 % | 1 % |
| CV(RMSE) | | | | | 2 % | 3 % | 1 % |
| R ² | | | | | 0,97 | 0,99 | 1,00 |

Sanierungswand

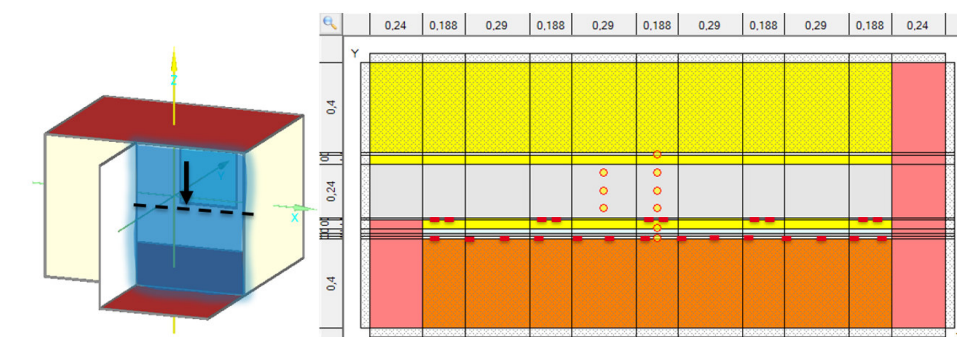


Bild 42:
Teilmodell Sanierungswand.

Tabelle 9:
Validierung der Temperaturen Sanierungswand-Teilmodell.

| 100 % Beladung, aktive Entladung | | | | | | | |
|----------------------------------|----------|----------|-------------|-------------|-----------|-----------|---------|
| | Lade VLT | Lade RLT | Entlade VLT | Entlade RLT | OFT außen | OFT innen | Bauteil |
| NMBE | 2 % | -2 % | 2 % | -1 % | 0 % | 0 % | 3 % |
| CV(RMSE) | 5 % | 6 % | 4 % | 6 % | 1 % | 11 % | 5 % |
| R ² | 0,95 | 0,98 | 0,97 | 0,87 | 0,98 | 0,85 | 1,00 |

| 100 % Beladung, alternierende Entladung | | | | | | | |
|---|----------|----------|-------------|-------------|-----------|-----------|---------|
| | Lade VLT | Lade RLT | Entlade VLT | Entlade RLT | OFT außen | OFT innen | Bauteil |
| NMBE | 3 % | -1 % | 3 % | 0 % | 0 % | -4 % | 3 % |
| CV(RMSE) | 6 % | 7 % | 6 % | 6 % | 1 % | 8 % | 5 % |
| R ² | 0,96 | 0,99 | 0,96 | 0,91 | 0,98 | 0,91 | 1,00 |

| 100 % Beladung, passive Entladung | | | | | | | |
|-----------------------------------|----------|----------|-------------|-------------|-----------|-----------|---------|
| | Lade VLT | Lade RLT | Entlade VLT | Entlade RLT | OFT außen | OFT innen | Bauteil |
| NMBE | | -2 % | | | 1 % | -7 % | 5 % |
| CV(RMSE) | | 3 % | | | 2 % | 13 % | 6 % |
| R ² | | 0,98 | | | 1,00 | 0,81 | 0,99 |

Fazit Validierung

Der Vergleich der Messwerte aus den Versuchen im Technikum (siehe Kapitel 2.4) mit den berechneten Werten der Simulationen zeigen Unterschiede, jedoch in zu erwarteten Bereichen. Abweichungen sind unter anderem zurückzuführen auf Detailgrad des Simulationsmodells (homogene Bauteilschichten und Materialeigenschaften, ideale Lage der BTA, völlig durchmischte Raumluft, grobe Diskretisierung etc.) und Messtoleranzen der durchgeführten Versuche. Im Allgemeinen zeigen die Temperatur-Verläufe und statistischen Indizes gute Übereinstimmung und bestätigen, dass die Simulationsmodelle für weitere Untersuchungen, auch am Gesamtgebäude, geeignet sind.

2.3 Optimierung und Implementierung von Regelstrategien

2.3.1 Definition der Regelungs- und Steuerungsstrategien

In gemeinsamer Diskussion wurden die Grundlagen für die weiterführenden Definitionen des Schnittstellenkonzeptes und der Regelungsfunktionen erarbeitet. Zur Veranschaulichung des Gesamtkonzeptes wurde eine Übersicht (Bild 43) der einzelnen Signalflüsse erstellt. Hierin wird dargestellt, welche Eingangsdaten und Parameter notwendig sind und wo sie verarbeitet werden, damit die unterschiedlichen Speichertypen mit Überschussstrom beladen und anschließend wieder entladen werden können.

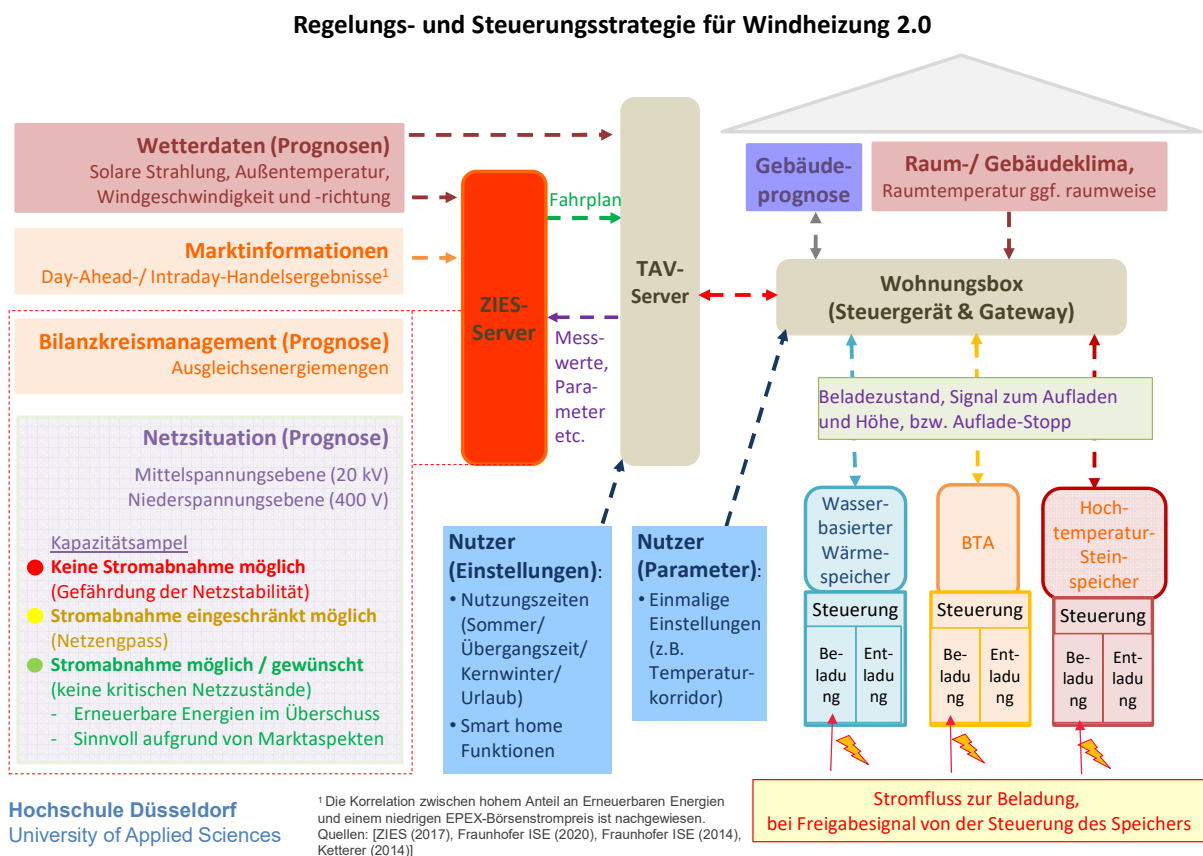


Bild 43:
Regelungs- und Steuerstrategie für Windheizung 2.0.

2.3.2 Definition des Schnittstellenkonzeptes zu den unterschiedlichen Wärmespeichertypen und dem ZIES

Zu jeder Schnittstelle (Buchstaben in Bild 44) gehören Teilnehmer, die als Teilnehmer 1 und Teilnehmer 2 bezeichnet werden. Im Weiteren ist es notwendig die Übertragungsart, das physikalische Medium der Übertragung und die entsprechende Protokollierung initial zu definieren. Dazu ist es möglich, vorhandene Technologien bei allen Teilnehmer im Forschungsprojekt zu nutzen (z.B. ModBus zu den Steuerungen der Speicher, vorhandene API's (Application Programming Interface) für die Server-Kommunikation). Die folgende Definition der Schnittstellen (Tabelle 10) wurde erarbeitet.

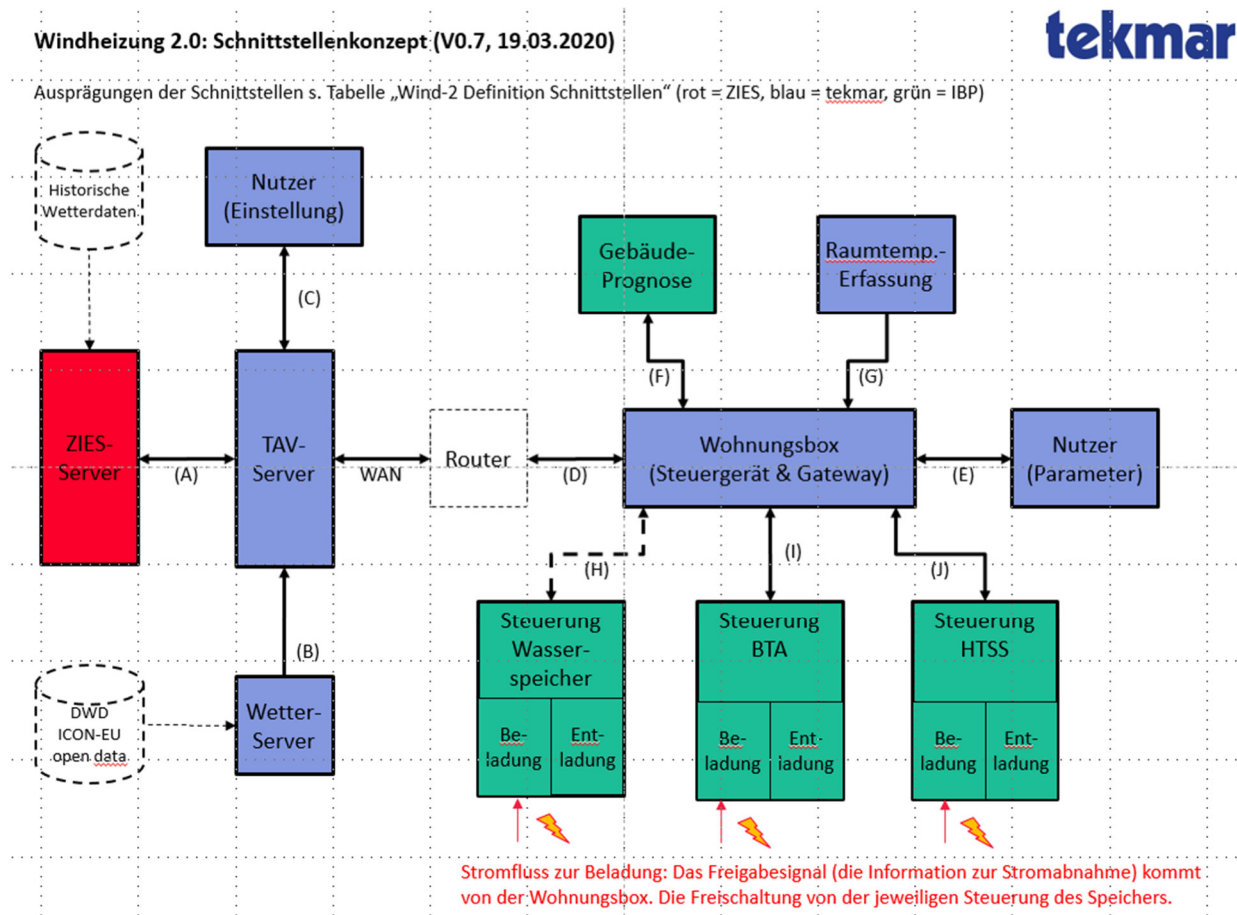


Bild 44:
Schnittstellenkonzept.

Tabelle 10:
Schnittstellenübersicht.

| Schnittstelle | A | B | C | D | E | F | G | H | I | J |
|------------------------|-------------------------------------|-----------------------------|---------------------------|--|--|---|-------------------------------------|---------------------|---------------------|--------------------------|
| Teilnehmer 1 | ZIES-Server | Wetterserver | Browser (PC, Tablet etc.) | TAV-Server | PC mit Applikation | Gebäude-Prognose | Raumperatur-erfassung | Steuerung HTSS | Steuerung BTA | Steuerung Wasserspeicher |
| Projektpartner T1 | ZIES | tekmar | <Nutzer> | tekmar | tekmar | IBP | tekmar | IBP | IBP | IBP |
| Teilnehmer 2 | TAV-Server | TAV-Server | TAV-Server | Wohnungsbox | Wohnungsbox | Wohnungsbox | Wohnungsbox | Wohnungsbox | Wohnungsbox | Wohnungsbox |
| Projektpartner T2 | tekmar | tekmar | tekmar | tekmar | tekmar | tekmar | tekmar | tekmar | tekmar | <nur Simulation> |
| Übertragung | <Internet> | <Internet> | <Internet> | LAN oder WLAN | tbd | LAN oder WLAN | TFN (tekmar) | seriell asynchron | seriell asynchron | - |
| Transport | TCP/IP | TCP/IP | TCP/IP | TCP/IP | (intern) | TCP/IP | wireless mBus | 9600 Bd, even | 9600 Bd, even | - |
| Protokoll | HTTPS | (intern) | HTTPS | (intern) | (intern) | HTTP | (intern) | Modbus RTU | Modbus RTU | - |
| Darstellung | REST-API (JSON) | (intern) | HTML5-Seite | (intern) | (intern) | REST-API (JSON) | (intern) | Holding-Register | Holding-Register | - |
| Inhalt T1 -> T2 | Fahrpläne | Wetterprognose (Temperatur) | Nutzer-Einstellungen | Nutzer-Einstellungen, Wetterdaten, Fahrpläne, Uhrzeit, tbd | Nutzer-Parameter, evtl. Nutzer-Einstellungen | s. Tabelle "REST-API" | Raumperatur-Istwerte, max. 32 Räume | s. Tabelle "Modbus" | s. Tabelle "Modbus" | - |
| Inhalt T2 -> T1 | Messdaten, Parameter | <keine> | Anlagenstati | Energieprognose, Messdaten, Parameter | evtl. Anlagenstati | s. Tabelle "REST-API" | <keine> | s. Tabelle "Modbus" | s. Tabelle "Modbus" | - |
| Anmerkungen (optional) | REST-API gemäß Spezifikation tekmar | | | | | REST-API gemäß Spezifikation tekmar (noch zu erstellen in Tool "swagger") | | | | |

Eine detailliertere Definition der ModBus Schnittstelle zwischen der tekmar Wohnungsbox und der SPS der Fraunhofer IBP-Versuchsstände findet sich in Tabelle 11. Der Rest-API zwischen der tekmar Wohnungsbox und der Wärmebedarfsprognose des Gebäudes findet sich in Tabelle 12.

Tabelle 11:
Definition ModBus-Kommunikation.

| Sender | Empfänger | Bereich | Signal | Einheit | Wertebereich | Informationsinhalt | Startadresse [dez] | Anzahl Register | Kommentar |
|--------------------|--------------------|-----------|---|---------|--------------|--|--------------------|-----------------|--|
| Wohnungsbox | Steuerung HTSS/BTA | Beladen | Freigabe Windstrom | bool | 0 1 | 1 = Windstrom verfügbar | <tbd> | 1 | |
| Wohnungsbox | Steuerung HTSS/BTA | Beladen | Sollwert Energieinhalt Heizenergie-Speicher | Prozent | 0 .. 100 | 0% = minimale, 100% = maximale Kerntemperatur | <tbd> | 1 | mit Windstrom |
| Wohnungsbox | Steuerung HTSS/BTA | Beladen | Sollwert Nachheizen | Prozent | 0 .. 100 | <tbd> | <tbd> | 1 | mit Normalstrom, HTSS = Luftheizregister, BTA = Flächenheizung |
| Wohnungsbox | Steuerung HTSS/BTA | Entladen | Sollwert Raumheizleistung | Prozent | 0 .. 100 | 100% = Auslegungsleistung des Raumes | <tbd> | 32 | Auslegung für 32 Räume |
| Wohnungsbox | Steuerung HTSS/BTA | Beladen | Sollwert Energieinhalt TTW-Speicher | Prozent | 0 .. 100 | 100% = Auslegungsenergie des Speichers | <tbd> | 1 | bei HTSS ist TTW-Ladung abhängig von Heizenergie-Speicher |
| Wohnungsbox | Steuerung HTSS/BTA | Steuerung | Betriebsart | Integer | 0 .. 3 | 0 = System abschalten 1 = nur TTW-Betrieb 2 = Übergangszeit (keine volle Speicherung, nicht alle Räume beheizt) 3 = Heizbetrieb (volle Speicherung, alle Räume beheizt) | <tbd> | 1 | |
| Steuerung HTSS/BTA | Wohnungsbox | Beladen | Istwert Energieinhalt | Prozent | 0 .. 100 | 0% = minimale, 100% = maximale Kerntemperatur | <tbd> | 1 | |
| Steuerung HTSS/BTA | Wohnungsbox | Beladen | Auslegungskapazität | kWh | 0 .. 100.000 | maximale Aufladeenergie des Wärmespeichers | <tbd> | 1 | Produkt aus Aufladeleistung des Energiespeichers und Ladezeit bis zum Erreichen der Auslegungstemperatur (gleich Energieinhalt des Speichers bei Auslegungstemperatur abzüglich natürlicher Verluste bei ununterbrochener Aufladung) |
| Steuerung HTSS/BTA | Wohnungsbox | Entladen | Istwert Raumheizleistung | Prozent | 0 .. 100 | 100% = Auslegungsleistung des Raumes | <tbd> | 32 | Auslegung für 32 Räume |
| Steuerung HTSS/BTA | Wohnungsbox | Entladen | Anteil Raumauslegungsleistung | Prozent | 0 .. 100 | Anteil der Auslegungsleistung des einzelnen Raumes an der Auslegungsleistung des Gesamthauses | <tbd> | 32 | Auslegung für 32 Räume |
| Steuerung HTSS/BTA | Wohnungsbox | Beladen | Istwert Energieinhalt TTW-Speicher | Prozent | 0 .. 100 | 100% = Auslegungskapazität des Speichers | <tbd> | 1 | |

Tabelle 12:
Definition Rest-API.

| Sender | Empfänger | Daten | Einheit | Wertebereich | Informationsinhalt | Anzahl Werte | Kommentar |
|-----------------|-----------------|-------------------------------------|---------|-------------------|--|-------------------------------------|---|
| Wohnungsbox | Gebäudeprognose | Wetterprognose: Temperatur | °C | -100, 0 .. +100,0 | Zukunfts-Zeitreihe der prognostizierten Außentemperatur | 10 d * 24 h/d = 240 h | Index 0 = nächste volle Stunde; Verfügbarkeit von 240 Stunden in die Zukunft in kostenlosen Daten des DWD noch zu klären (Abstimmung Wettermodell mit ZIES) |
| Wohnungsbox | Gebäudeprognose | Wetterprognose: Solare Einstrahlung | tbd | tbd | Zukunfts-Zeitreihe der prognostizierten Solareinstrahlung | 10 d * 24 h/d = 240 h | s.o. Die Solareinstrahlung wird nur für den Energiegewinn des gesamten Gebäudes verwendet, nicht für einzelne Räume (keine Einzelraum-Prognose) |
| Wohnungsbox | Gebäudeprognose | Wetterprognose: Bedeckungsgrad | Prozent | 0 .. 100 | Zukunfts-Zeitreihe des prognostizierten Bedeckungsgrads (noch mit Sonnenstand Tag/Jahr zu verbinden für Einwirkung auf Gebäude) | 10 d * 24 h/d = 240 h | s.o. Alternative zu solarer Einstrahlung, falls diese nicht verfügbar ist |
| Wohnungsbox | Gebäudeprognose | Raumtemperatur-Soll | °C | -100, 0 .. +100,0 | Zukunfts-Zeitreihe der vom Nutzer gewünschten Raumtemperatur; bei mehreren Räumen mit der Raum-Auslegungslösung gewichteter Mittelwert aller Räume | 10 d * 24 h/d * 4 p/h = 960 p | Perioden (p) = 15 min Raster der Energiewirtschaft; Index 0 = nächste volle Viertelstunde |
| Wohnungsbox | Gebäudeprognose | Beladungszustand | Prozent | 0 .. 100 | relativer Ist-Energieinhalt des Wärmespeichers | 1 | lineare Interpolation der Ist-Temperatur des Speichers zwischen Standard-Raumtemperatur (20°C) und seiner maximalen Auslegungstemperatur |
| Wohnungsbox | Gebäudeprognose | Auslegungskapazität | kWh | 0 .. 100.000 | maximale Aufladeenergie des Wärmespeichers | 1 | Produkt aus Aufladeleistung des Energiespeichers und Ladezeit bis zum Erreichen der Auslegungstemperatur (gleich Energieinhalt des Speichers bei Auslegungstemperatur abzüglich natürliche Verluste bei ununterbrochener Aufladung) |
| Gebäudeprognose | Wohnungsbox | Wärmebedarf | Prozent | 0,000 .. 1000,000 | relativer Wärmebedarf des Gebäudes | 10 d * 24 h/d * 4 p/h = 960 p | Perioden und Index 0 s.o.; Energiebedarf während einer Periode bezogen auf die Auslegungskapazität |
| Gebäudeprognose | Wohnungsbox | Restspeicherzeit | Stunden | 0 .. 1000 | Zeitdauer, für die das Gebäude noch aus dem Wärmespeicher beheizt werden kann | 1 | Typ der Restlaufzeit (s. Präsentation "Gebäudeprognose" S. 9 bis 11) noch festzulegen |

Der sichere Austausch der Informationen zum jeweiligen Fahrplan (drei Typen) konnte mit ZIES und TAV Server erfolgreich erprobt und stabilisiert werden. Zur Erreichung dieser Ergebnisse wurde der Wetter-Prognosehorizont auf 180 Stunden erweitert. Basis der Wetterinformationen ist das DWD (COSMO-D2, ICON-EU, ICON). In Bild 45 ist eine Übersicht der einzelnen Elemente dargestellt.

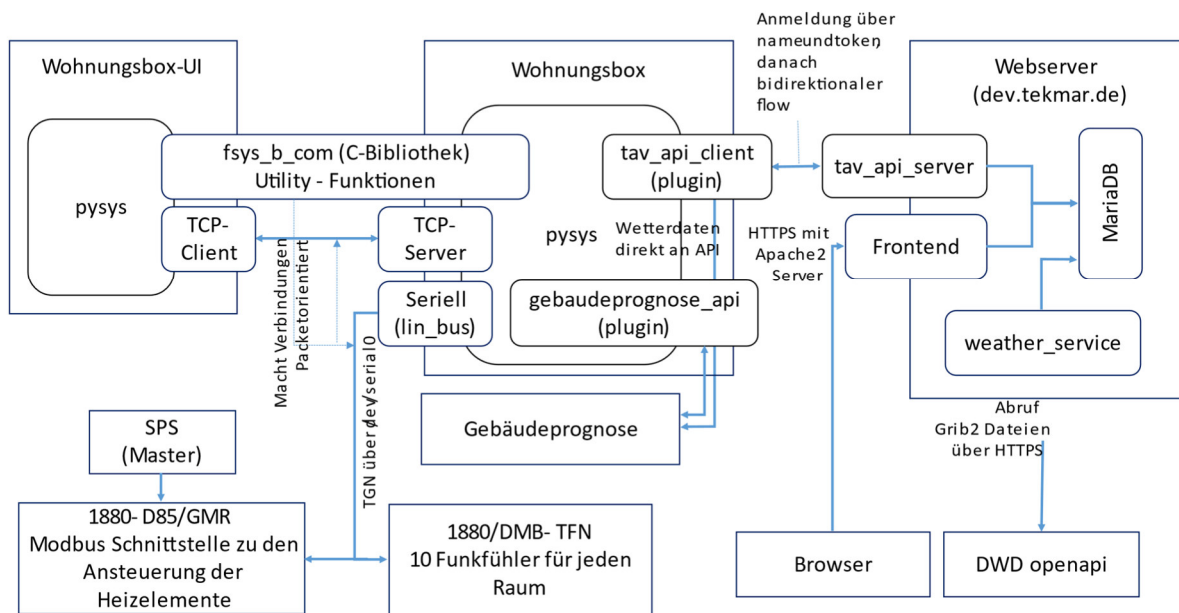


Bild 45:
Architektur des Windheizung 2.0 Schnittstellenkonzepts.

Tekmar bedient sich zur Realisierung und Integration der neuen Software-Module, vorhandener Hardware wie das Modbus-Gateway (Kommunikation zwischen der tekmar Wohnungsbox und der Prüfstands-SPS des Fraunhofer IBP) und dem DMB-TFN Gateway (WMB-Kommunikation zur jeweiligen Raumtemperatur Erfassung). Hier wurden spezifische Software-Pakete zur Kompatibilität in der Kommunikation mit dem Fraunhofer IBP entwickelt bzw. angepasst. Die Entwicklung der neuen Software-Module und Algorithmen zur Kommunikation und Regelung der drei Speichersysteme wurde in der Wohnungsbox (Linux-basierter Rechner) realisiert. Zur lokalen Bedienung der Systeme wurde jeweils ein Userinterface vor Ort installiert. Die Gebäudeprognose wird vor Ort in dem einzelnen System via IP Netz und separatem Rechner zur Verfügung gestellt. Eine Fernbedienung aus Sicht des möglichen Endnutzers des jeweiligen Systems erfolgt über ein neu entwickeltes plattformunabhängiges Test Front End (siehe Bild 46 und Bild 47). Dieses ermöglicht es, die Anlage aus der Ferne zu bedienen.

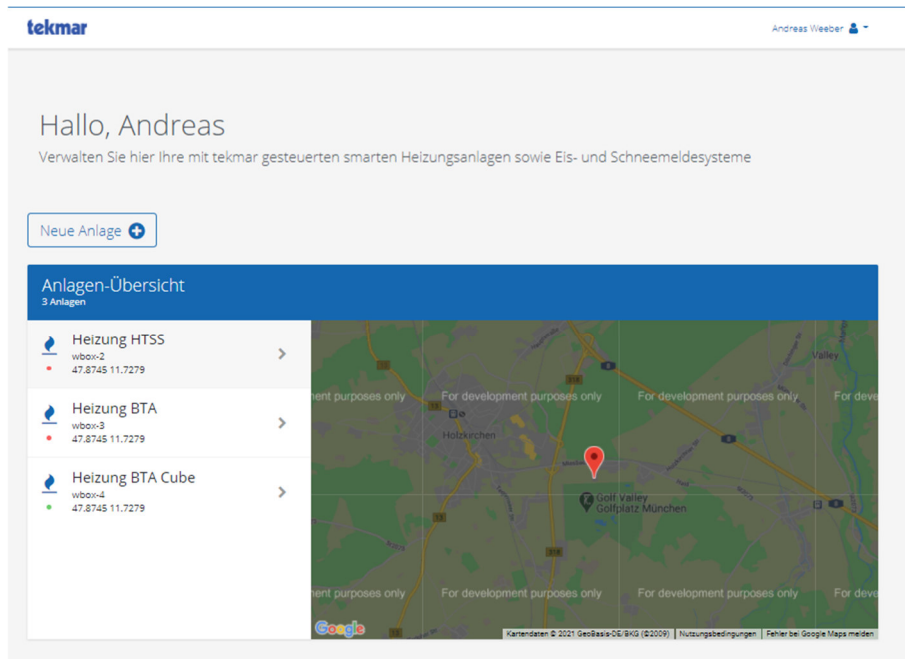


Bild 46:
Front End Anlagenübersicht.

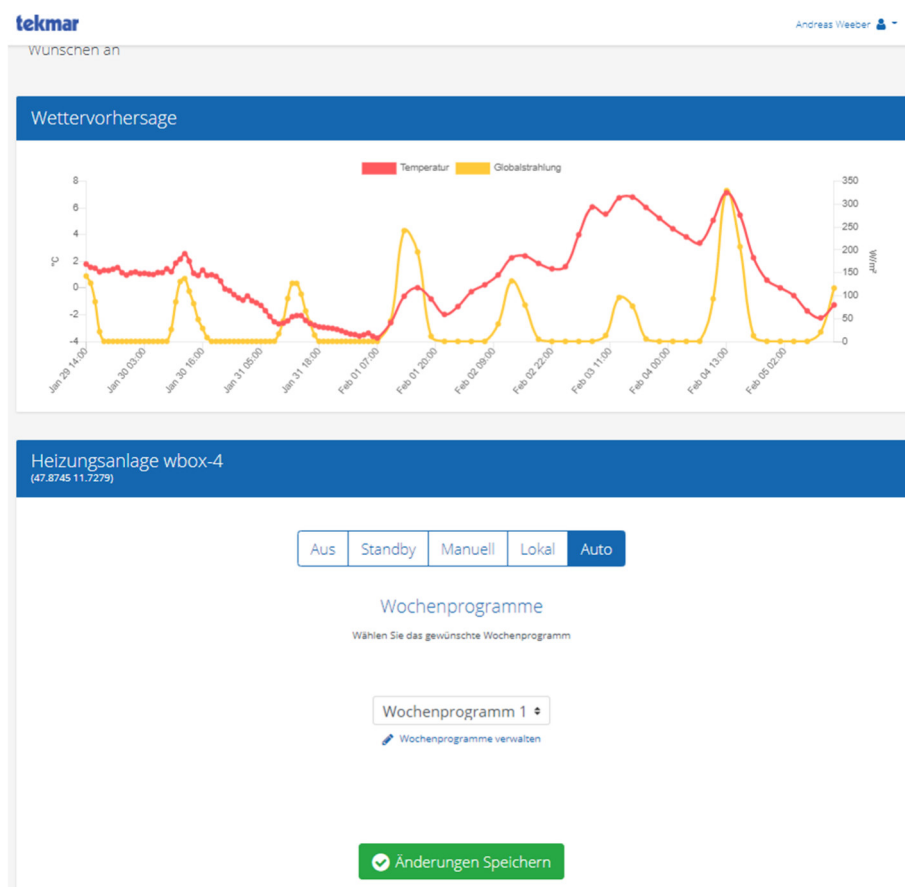


Bild 47:
Front End inkl. Wetterprognose / Bedienung.

2.3.3 Definition der Regelungsfunktion zu den unterschiedlichen Wärmespeichertypen

Für die Freilandversuche im Rahmen dieses Forschungsprojekts ist das Unternehmen tekmar für den TAV Server, die Wohnungsbox, die Raumtemperaturerfassung und die Nutzer-Einstellungen via plattformunabhängiger App und vor Ort für die Parametrierung der „Wohnungsbox“ (Steuergerät & Gateway) verantwortlich. Weitergehend wurden für alle drei Speichersysteme (HTSS, BTA-Zwillingshaus und BTA-Cube) entsprechende Parametrierungswerte zur Regelung und Steuerung definiert (siehe Bild 48 und Bild 49).

| Vorgaben IBP | Ladegrad | Entladung | Z-Heizung | Einheit | HTSS | BTA-Zwillingshaus | Cube |
|---|----------|-----------|-----------|---------|--|--|--|
| Allgemeines | | | | | | | |
| Deckengröße | | | | | n.a. | 92 m ² | 19,8 m ² |
| Auslegungstemperatur (Holzkirchen) | | | | | -14°C | -14°C | -14°C |
| Auslegungs-Heizlast des Gebäudes | | | | | 2,4 kW (wie natürliche Entladung) | 1803 W (wie natürliche Entladung) | 155 W (wie natürliche Entladung) |
| Aufladung des Speichers | | | | | | | |
| Anschlussleistung Pan | | | | | ca. 50 - 70 kW, ang. 50 kW Leistung über lfd. Ladezeit abnehmend | 50 kW Leistung über lfd. Ladezeit abnehmend | 9 kW Leistung über lfd. Ladezeit abnehmend |
| Vollladezeit Tv von 0 bis 100% Ladegrad (LG) (Zwischenbericht 19Q4, S. 10) | | | | | ca. 9h | ca. 9h | ca. 9h |
| Energieinhalt brutto Eb = Pan * Tv (nominal) (ohne Verluste während der Aufladung) | | | | | 50 kW * 9 h = 450 kWh | 50 kW * 9 h = 450 kWh | 9 kW * 9 h = 81 kWh |
| Energieinhalt netto (nach Versuchsergebnissen) | | | | | tbd | 1,8 kWh / m ² * 92 m ² = 165,6 kWh | 2,5 kWh / m ² * 19,8 m ² = 49,5 kWh |
| Natürliche Entladung des Speichers | | | | | | | |
| Verfahren | | | | | über Mantelluft | über Wärmeleitung durch Bauteile in den Raum | über Wärmeleitung durch Bauteile in den Raum |
| Höhe des Wärmeflusses V @ 100% LG | | | | | 2,4 kW | 7,5 W/m ² nach oben + 8,2 W/m ² nach unten + 25 % unbekannte Verluste = 19,6 W/m ² * 92 m ² = 1803 W | 6,5 W/m ² nach unten + 20 % Rand- & unbekannte Verluste = 7,8 W/m ² * 19,8 m ² = 155 W |
| Thermisches Verhalten | | | | | PT1 | PT1 | PT1 |
| Zeitkonstante des PT-Gliedes Tpt1 rechnerisch | | | | | 450 kWh / 2,4 kW = 188 h | 165,6 kWh / 1,8 kW = 92 h | 49,5 kWh / 0,155 kW = 319 h |
| Zeitkonstante des PT-Gliedes nach Versuch | | | | | | 46 h | 84 h |

Bild 48:
Exemplarischer Auszug Parametrierungsvorgaben des Fraunhofer IBP.

| Kennwerte IBP numerisch | Ladegrad | Entladung | Z-Heizung | Einheit | HTSS | BTA-Zwillingshaus | Cube | |
|---|----------|-----------|-----------|---------|--------------|-------------------|--------|--------|
| Anschlussleistung Pan (nominal) | | | | | kW | 50,0 | 50,0 | 9,0 |
| Vollladezeit Tv | | | | | h | 9,0 | 9,0 | 9,0 |
| Speicherinhalt brutto nach Vollauffladung (Eingangsenergie) | 100% | | | | kWh | 450,0 | 165,6 | 49,5 |
| mittlere Eingangsleistung bei Vollauffladung | | | | | kW | 50,0 | 18,4 | 5,5 |
| Natürliche Verluste @ 100% LG | 100% | | | | kW | 2,4 | 1,8 | 0,2 |
| Gesteuerte Entladung @ 100% LG | 100% | 100% | | | kW | 2,4 | 1,0 | 1,9 |
| Zusatzheizung | | | 100% | | kW | 2,0 | 2,6 | 0,5 |
| Auslegungs-Heizlast | | | | | kW | 2,4 | 1,8 | 0,2 |
| Kennwerte tekmar | | | | | | | | |
| Berechnete Parameter Realsystem | | | | | | | | |
| Energieinhalt brutto | | | | | kWh | 450,0 | 165,6 | 49,5 |
| Entladung natürlich | | | | | | | | |
| Entladeleistung | 100% | 0% | | | kW | 2,4 | 1,8 | 0,2 |
| Entlade-Zeitkonstante | | 0% | | | h | 187,5 | 91,8 | 319,4 |
| Entlade-Faktor | | 0% | | | 1/h (kW/kWh) | 0,0053 | 0,0109 | 0,0031 |
| Energieinhalt netto nach Vollauffladung | 100% | 0% | | | kWh | 439,2 | 157,5 | 48,8 |

Bild 49:
Exemplarischer Auszug Parametrierungswerte Fraunhofer IBP / tekmar.

2.3.4 Prognose-System des Gebäude-Wärmebedarfs

Ein wesentlicher Aspekt der Windheizung 2.0-Speicher ist die Eigenschaft, dass im Zustand nach erfolgter Beladung die passiven Wärmeverluste des Speichers maximal dem Heizwärmebedarf des Windheizung 2.0-Gebäudes entsprechen. Der Heizwärmebedarf, und damit der Wärmebedarf des kommenden Überbrückungs-Zyklus, hängt neben der Dauer bis zum nächsten Windstromereignis von der Wetterlage der kommenden Tage ab. Folglich muss die Windheizung 2.0-Regelung während eines Ladezyklus zur Anpassung der Lademenge über Informationen zum künftigen Bedarf verfügen, entsprechend dem Ansatz einer modellbasierten Regelung (Model Predictive Control, MPC).

Da der Regler in der späteren Anwendung für potentiell unbekannte Gebäude und Bewohner zum Einsatz kommt, fällt die Wahl zur Lösung der Aufgabe auf einen rein datenbasierten (data-driven) Ansatz, ohne physikalische Modellierung, der selbstlernfähig ist. Die einzigen Informationen, die über zukünftige Zeitpunkte zur Verfügung stehen, sind Daten aus der Wettervorhersage (Außenlufttemperatur und solare Globalstrahlungsintensität) sowie die voreingestellten Solltemperatur-Profile. Es muss also eine Methode erstellt werden die, basierend auf dem historischen Wärmebedarf (abhängig von der nutzerspezifisch gewünschten Solltemperatur) und historischen Wettervorhersagen, ein Modell trainiert. Dieses Modell muss anschließend in der Lage sein, unter ausschließlicher Verwendung einer Wettervorhersage und der Solltemperaturen, den Wärmebedarf des Windheizung 2.0-Gebäudes vorherzusagen. Durch regelmäßiges Re-Trainieren des datenbasierten Modells (online-learning) können Veränderungen im Gebäude oder der Nutzung berücksichtigt werden. Dieser Ablauf ist in Bild 50 skizziert. Aus der Wettervorhersage werden die Außenlufttemperatur und die Intensität der Solarstrahlung importiert. Die erstellte Methode verwendet Algorithmen, welche die notwendigen Eingangsparameter inkl. deren Ordnung (Lags / Schritte in die Vergangenheit) automatisch identifizieren, die anderen verfügbaren Daten verwerfen und Koeffizienten für die beibehaltenen Inputs ermitteln. Die gesamte Methode ist in der Maschinsprache R-Script erstellt und wird als Docker-Container in die Regelung eingebunden.

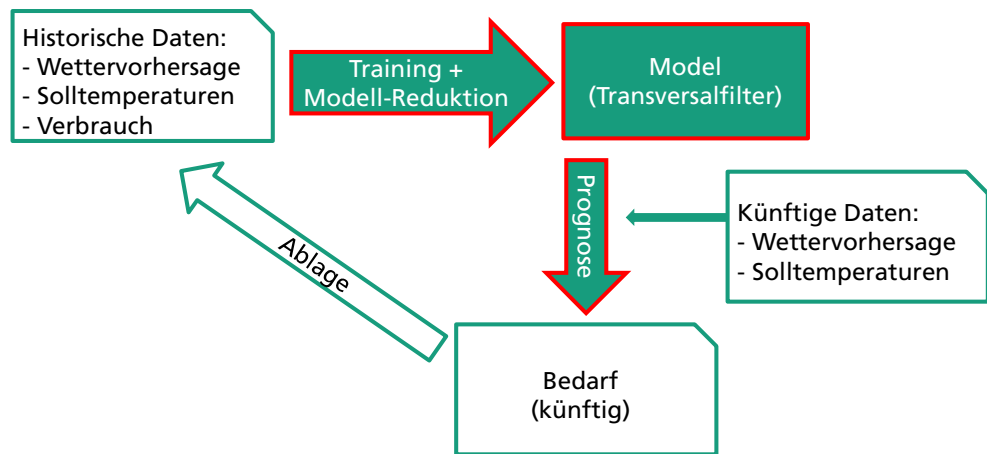
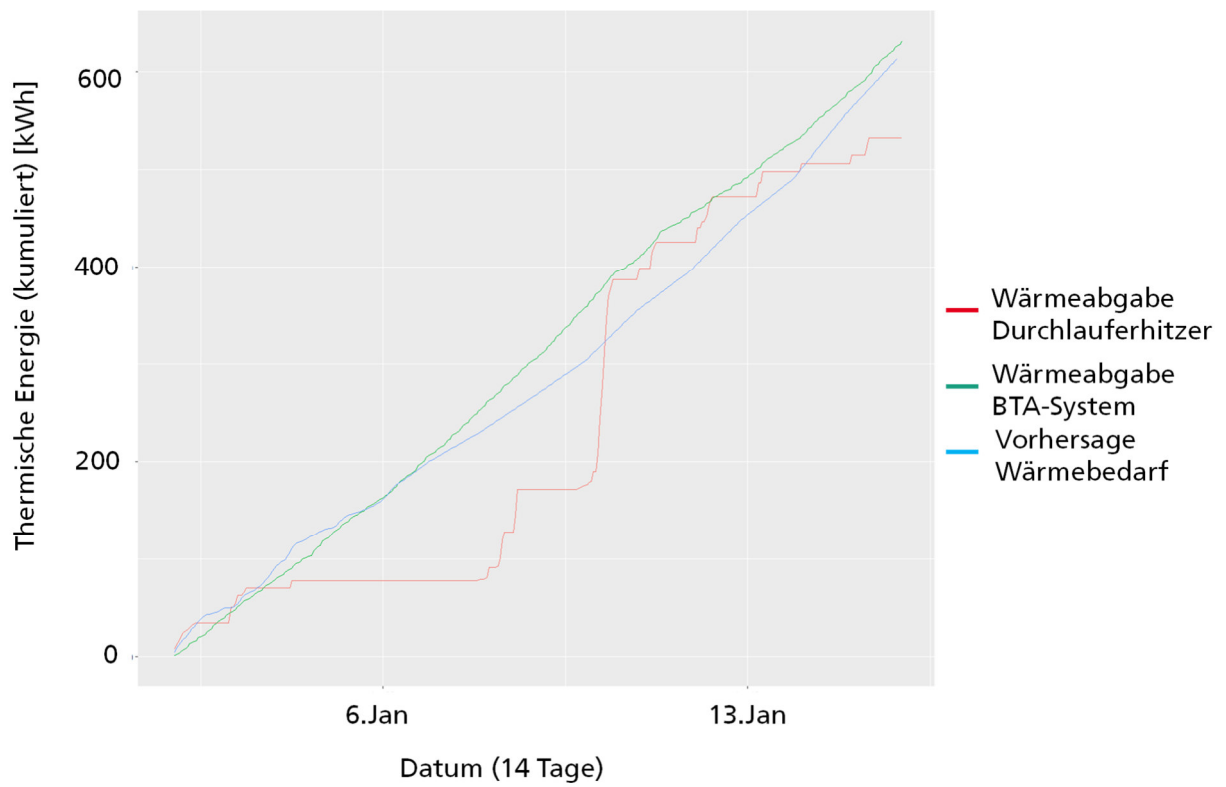
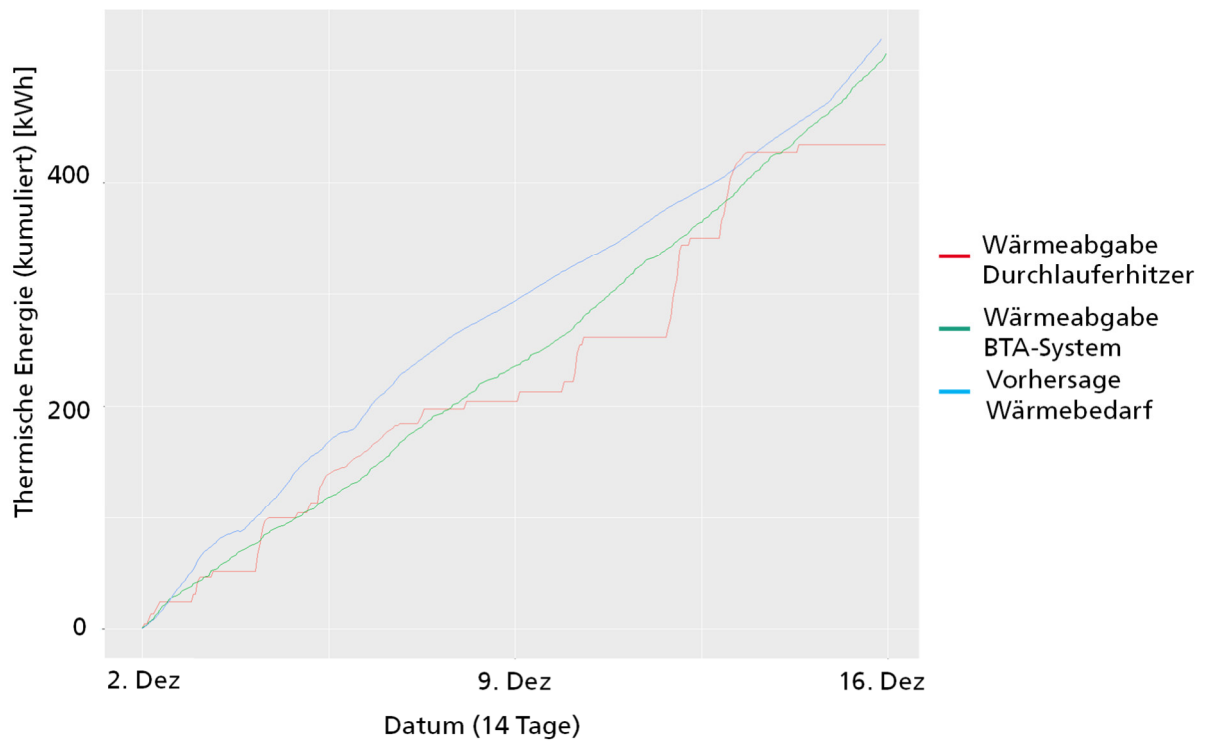


Bild 50:
Ablauf-Schema der Methode zur Wärmebedarfsprognose des Windheizung 2.0-Gebäudes. Die Inhalte des Docker-Prognosecontainers sind grün hinterlegt.

Eine besondere Herausforderung ist die Tatsache, dass im Fall der Windheizung 2.0 der Strombezug nicht kontinuierlich ist, sondern im Rahmen von relativ seltenen aber hohen Leistungspeaks während der Überschussstrom-Verfügbarkeit stattfindet. Die Entwicklung und Validierung des Prognosemodells fand basierend auf einem WUFI Plus Simulationsmodell des BTA-Hauses mit einem Standardklimadatensatz statt. Dies bedeutet, dass die in diesem Kapitel gezeigte Validierung die Unsicherheiten, die sich aus der Wetterprognose selbst ergeben, unberücksichtigt lässt. Diese Validierung wurde an den drei in Bild 51 dargestellten Perioden durchgeführt. Als notwendige, abhängige Variablen des linearen Modells wurden die Vorhersage der Globalstrahlung, und die Differenz zwischen dem vom Nutzer vorgegebenen Sollwert der Raumlufttemperatur und der vorhergesagten Außenlufttemperatur verwendet. Die rote Linie stellt die elektrische Leistungsaufnahme und damit die thermische Leistungsabgabe eines Windheizung 2.0 Durchlauferhitzers dar; entsprechend entstehen die sprunghaften Anstiege in der kumulierten Energie. Die blaue Linie der Bedarfsvorhersage steigt stetig an, da dem verwendeten Modell keine Vorhersage eines Windstromsignals zur Verfügung steht. Für die Regelung ist nicht der dynamische Verlauf des Bedarfs von Bedeutung, sondern die kumulierte, gesamte Energiemenge am Ende des Überbrückungszeitraums. Hier kann man erkennen, dass die Abweichungen gegen Ende der drei beispielhaften Perioden etwa 20 Prozent, meist weniger, betragen. Dies soll als Sicherheitsmarge bei der Speicherladung berücksichtigt werden. Nicht vorhersehbare Änderungen der Solltemperaturen durch den Nutzer können naturgemäß nicht berücksichtigt werden. Die grüne Linie entspricht der Wärmeabgabe durch die Deckenflächen an die Räume und entspricht somit der eingebrachten Wärmemenge. Diese Größe ist ausschließlich in der Simulation verfügbar und hier nur als Vergleichswert abgebildet.



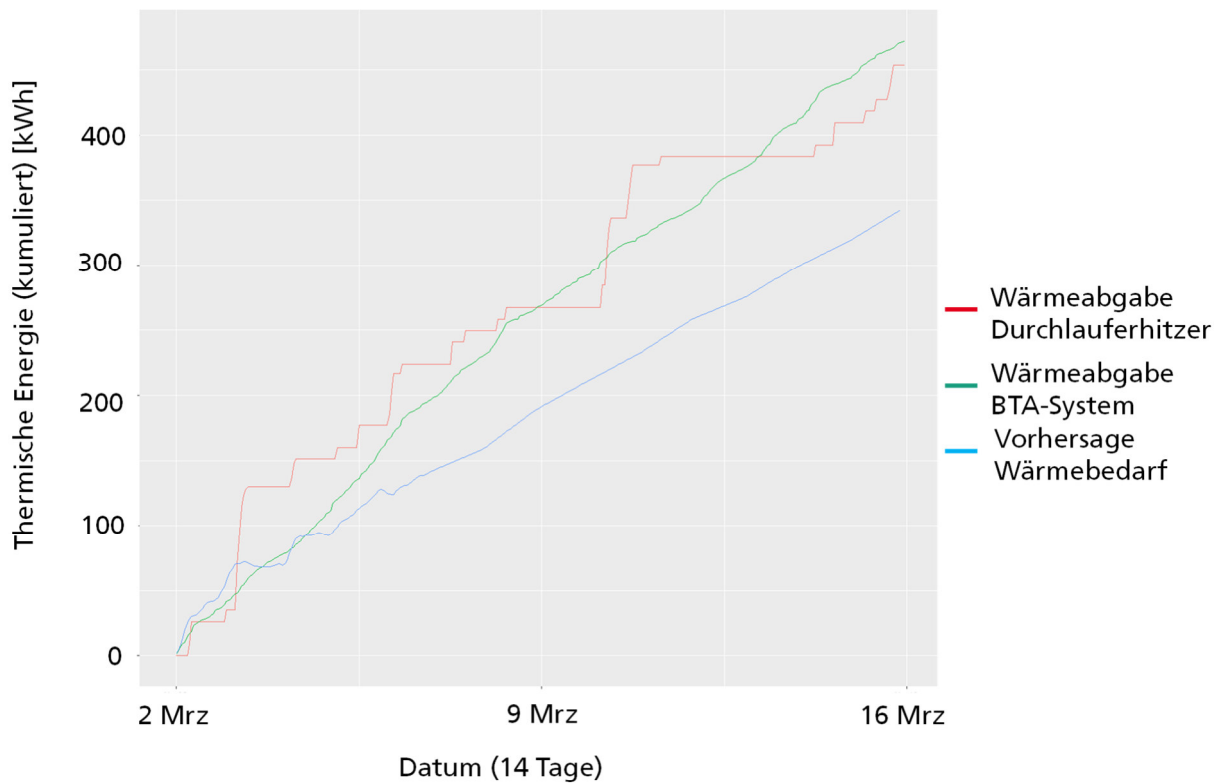


Bild 51:

Validierung der Prognose-Methode an drei über den Winter verteilten Perioden. Darstellung der kumulierten Energiemengen.

Das Prognose-System ist nicht direkt als Maschinensprache in der Wohnungsbox (dem Steuergerät) implementiert, sondern als externes Modell umgesetzt. Bereitgestellt wird die Anwendung mit der sogenannten Docker Software. Docker ist eine freie Software zur Isolierung bzw. Bündelung von Anwendungen, welche dann in einem sogenannten „Container“ bereitgestellt wird. Ein Container enthält alle benötigten Modelle, Daten und Programm-Pakete zur Ausführung der Anwendung. Dieser Container kann auf unterschiedliche Plattformen kopiert und dort mit der entsprechenden Docker Software ausgeführt werden. Die Plattform kann im Kleinen ein Einplatinencomputer (Raspberry-Pi), ein gewöhnlicher PC oder ein Server bzw. ein Rechenzentrum sein, je nachdem wie viel Rechenleistung die Anwendung benötigt.

Getestet wurde der Prognose-System-Container auf zwei unterschiedlichen Plattformen: Einem Raspberry-Pi und auf einem virtuellen Server im Fraunhofer IBP Netzwerk. Letztendlich wurde auf Grund der nötigen Rechenleistung und der verwendeten Programm-Bibliotheken des Prognose-Systems, die nicht ohne weiteres auf einem Einplatinencomputer ausführbar sind, die Ausführung auf einem zentralen Server am Fraunhofer IBP umgesetzt. Die Kommunikation, bzw. der Austausch von Daten zwischen dem Prognose-System und der Wohnungsbox erfolgt, unabhängig von der Plattform auf der der Container ausgeführt wird, über die REST-API und nutzt HTTP-Anfragen. Die Wohnungsbox und das Prognose-System kommunizieren somit über ein eigenes, lokales Netzwerk.

Welche Daten übertragen werden, besonders auch das genaue Format, ist im Rahmen der REST-API definiert. Es gibt hierfür unterschiedliche HTTP-Anfragemethoden, unter anderen genannt GET, PUT oder POST. Üblicherweise werden mit der GET Methode Daten vom Empfänger angefordert werden. Die PUT Methode sendet Daten an einen bestimmten Empfänger und die POST Methode sendet spezielle Daten, nachdem diese vom Empfänger angefordert wurden. Die Wohnungsbox und das Prognose-System senden die Informationen mit der PUT Methode zu bestimmten Zeitpunkten.

2.3.5 Betriebszustände

Um die Steuerungsanweisungen der tekmar-Wohnungsbox an die jeweiligen Speichersysteme und ihre periphere Installation zu übertragen, ist für jedes der drei Speichersysteme eine individuelle Regelungslogik erforderlich. Diese Logiken unterscheiden zwischen unterschiedlichen Betriebszuständen. Je nach Betriebszustand sind unterschiedliche Aktoren mit unterschiedlichen Regelkreisen aktiv.

HTSS - Wärmeentnahme

In der Tabelle in Anhang A.1.1 sind die einzelnen Betriebszustände des HTSS zusammen mit den jeweils aktiven Regelkreisen und Aktoren dargestellt. Die Betriebszustände des HTSS sind im Wesentlichen durch den Modus der Wärmeabgabe definiert. Passive Entladung, aktive Entladung, Nachheizen mit Reststrom oder TWW-Bereitung in der Prioritätsschaltung. Beim HTSS ist das Laden des Speichers jederzeit möglich, unabhängig von der Wärmeentnahme. Aus diesem Grund gibt es keine Betriebsart „Laden“. Ebenso können zusätzlich an den TWW-Speicher angeschlossene Heizflächen, sofern diese vorhanden sind, unabhängig von der Betriebsart jederzeit aus dem TWW-Speicher bedient werden. Entsprechend gibt es beim HTSS die folgenden Betriebszustände:

- **Passives Entladen:**
Der Betriebszustand des passiven Entladens tritt typischerweise bei höheren Ist-Ladegraden des HTSS auf. Hier werden die „Speicherverluste“ des Speicherkerns durch dessen Hauptdämmung hindurch im Spülluftspalt in den Heißluftkreis übertragen. Im Heißluftkreis steht diese Wärme dann den beiden Wärmetauschern zur Verfügung. Falls parallel Trinkwarmwasser benötigt wird, wird die entsprechende Zirkulationspumpe angesteuert, ansonsten ist diese deaktiviert.
- **Aktives Entladen:**
Bei sinkendem Ist-Ladegrad des HTSS wird vom passiven zum aktiven Entladen übergegangen. Hierbei wird der Heißluftstrom sukzessive statt über den Spülluftspalt durch den Kern umgeleitet. Die Regelung teilt unter Verwendung von Stellklappen die Spül- und die Kernluft so auf, dass an der Heißluftausschleusung des HTSS die aktuelle Solltemperatur des Heißluftkreises erreicht wird. Falls parallel Trinkwarmwasser benötigt wird, wird die entsprechende Zirkulationspumpe angesteuert, ansonsten ist diese deaktiviert.
- **Nachheizen:**
Im Nachheizbetrieb wird der HTSS, ähnlich wie bei der aktiven Entladung, mit einem Kernluftanteil von 100 Prozent gefahren, um möglichst viel Restwärme gewinnen zu können.

Die einzelnen Betriebszustände sind in Bild 52 bis Bild 55 visualisiert.

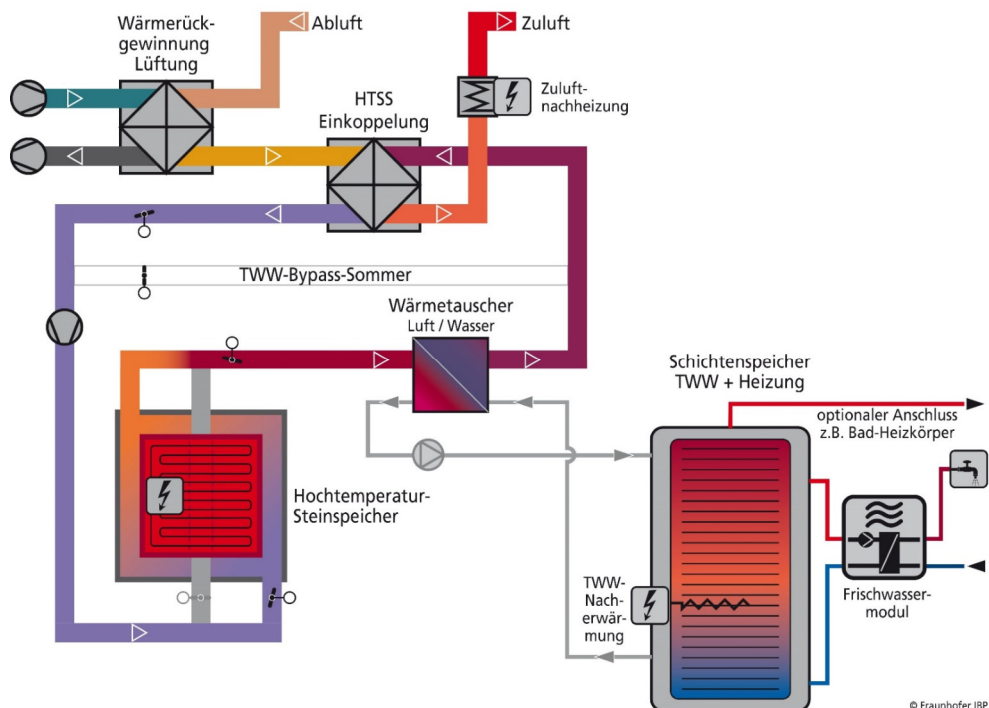


Bild 52:
Betriebszustand „Passives Entladen“ um den Speicherkern des HTSS.

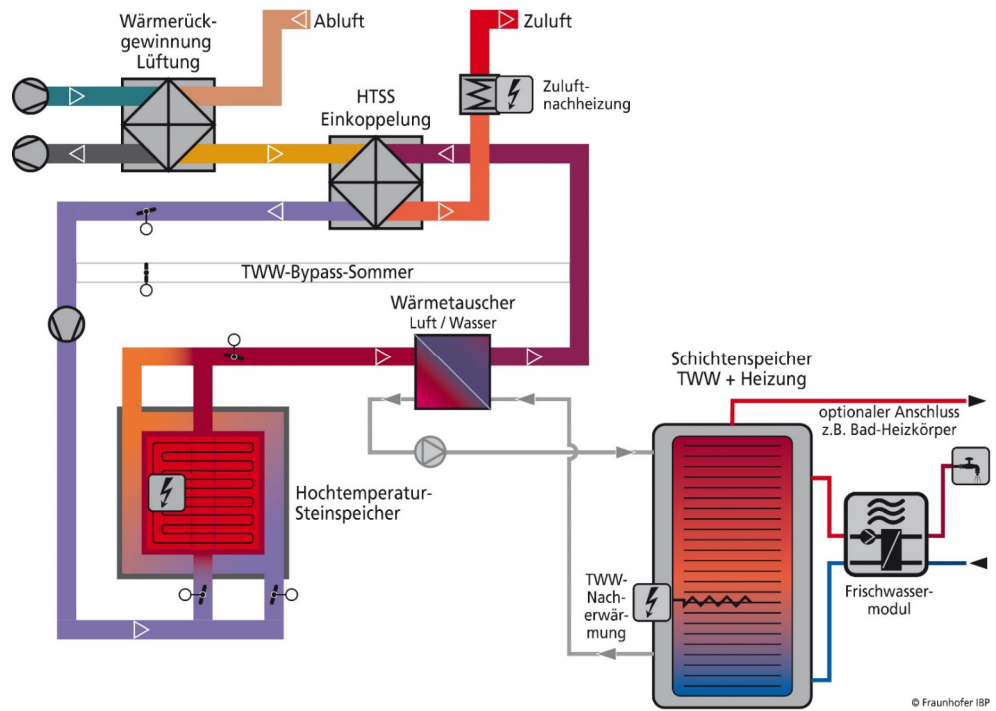


Bild 53:
Betriebszustand „Aktives Entladen“ durch den Speicherkern des HTSS.

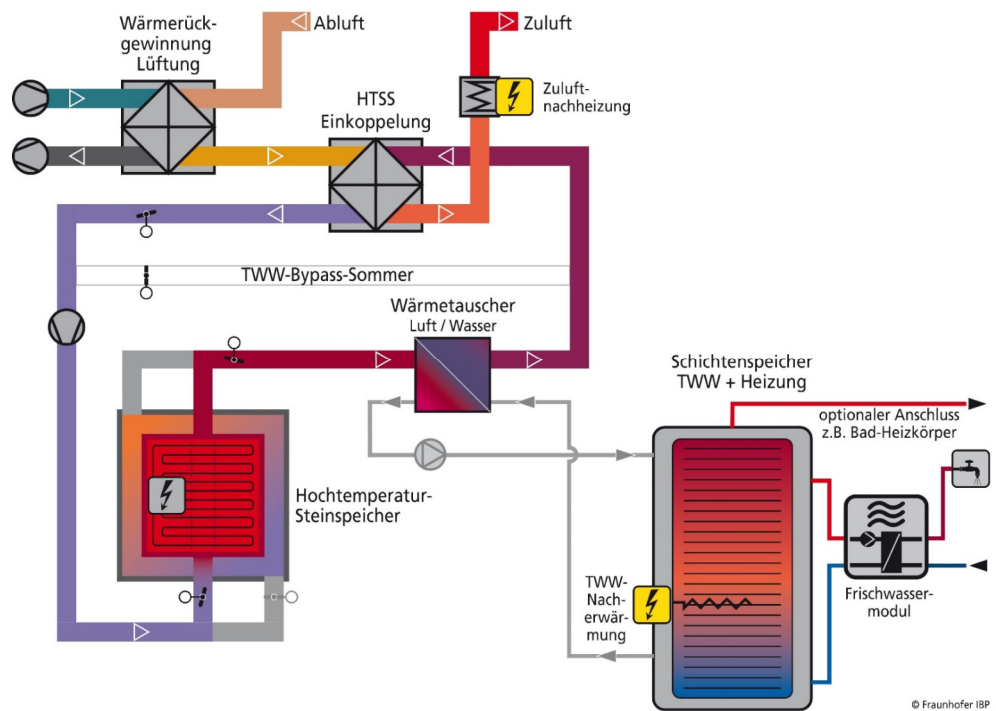


Bild 54:
Betriebszustand „Nachheizen“ des HTSS.

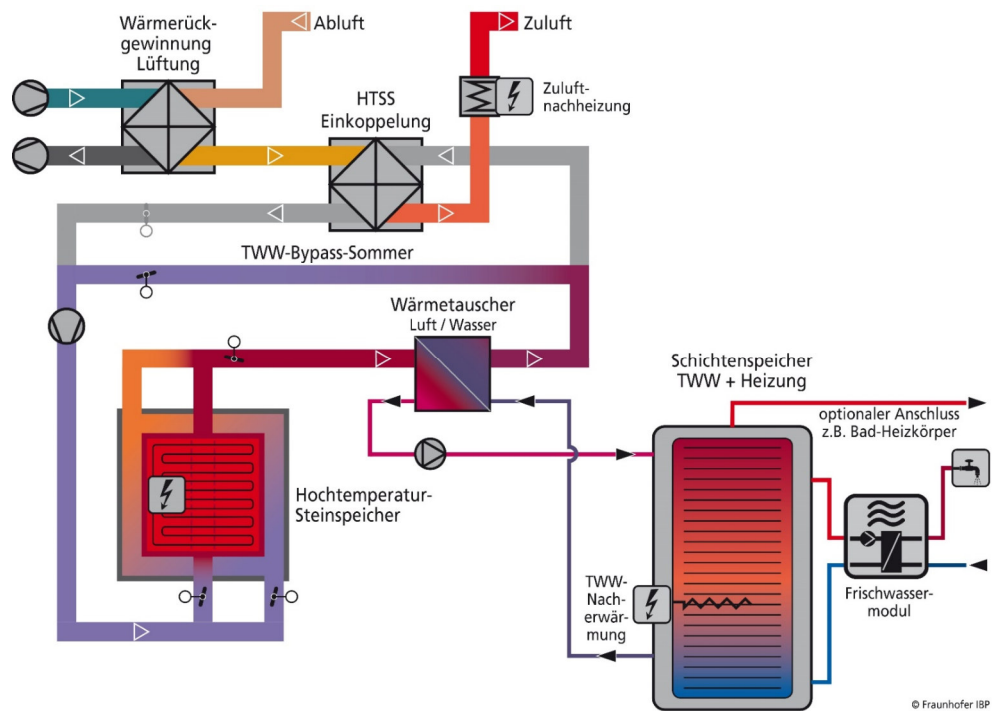


Bild 55:
Betriebszustand „TWW-Bereitung“ des HTSS.

BTA

In der Tabelle in Anhang A.1.2 sind die Betriebszustände für den BTA-Speicher dargestellt. Bei den Windheizung 2.0 BTA-Speichern gibt es die folgenden Betriebszustände:

- TWW-Bereitung (Winter/Sommer):
Falls der TWW-(Puffer-)Speicher geladen werden muss, wird die Wärmepumpe aktiviert. Als Wärmequelle bzw. Primärseite wird im Winter der BTA-Speicher, im Sommer die aktive Entladung durchströmt.
- (Speicher) Laden:
Beim Laden des Speichers wird Wasser im Durchlauferhitzer erwärmt und in den BTA-Speicherkern zirkuliert. Falls parallel eine Trinkwarmwasseranforderung vorliegt wird die Wärmepumpe aktiviert und zieht ihre Primärseite aus dem vom Durchlauferhitzer erwärmten Wasser.
- Anlage aus / Passives Entladen:
Analog zum HTSS wird in dieser Betriebsart beim geladenen Speicher der natürliche „Speicherverlust“ zur Beheizung des Gebäudes genutzt. Da sich die BTA-Speicher direkt in der zu beheizenden Gebäudezone befinden ist keine Aktivierung von anlagentechnischen Komponenten notwendig. Entsprechend ist die Anlage in diesem Zustand inaktiv.
- Aktives Entladen:
Analog zum HTSS wird die aktive Entladung dann aktiviert, wenn der Wärmestrom aus der passiven Entladung nicht mehr ausreicht, um die gewünschte Raumtemperatur zu halten. In dieser Betriebsart wird Heizungswasser aus dem BTA-Kern in die raumseitige aktive Entladung (Flächenheizung) zirkuliert um die Wärmeabgabe der BTA zu erhöhen.
- Aktives Entladen inkl. TWW-Bereitung:
In diesem Zustand wird, parallel zum oben beschriebenen aktiven Entladen, die Wärmepumpe aktiviert. Diese verwendet dann als Primärseite das zirkulierende Wasser.
- Nachheizen:
Diese Betriebsart wird aktiv, wenn der BTA-Speicherkern so weit entladen ist, dass die Raumsolltemperatur nicht mehr durch die aktive Entladung gehalten werden kann. Beim Nachheizen wird Wasser aus dem TWW-Pufferspeicher entnommen und durch die Flächenheizung der aktiven Entladung zirkuliert. Falls parallel eine Wärmeanforderung des TWW-Pufferspeichers vorliegt, wird die Wärmepumpe aktiviert und zieht ihre Primärseite aus der BTA.
(Die Betriebsart 9 (Anhang A.1.2, elektrisches Nachheizen) wird lediglich für die Versuche angewendet, ist im Realbetrieb aber nicht vorgesehen.)
- Laden + Nachheizen:
Wenn während der Betriebsart Nachheizen (leerer BTA-Speicher) ein Ladefreigabesignal erfolgt, wird das im Durchlauferhitzer erwärmte Wasser sowohl durch die Flächenheizung der aktiven Entladung als auch durch den BTA-Speicherkern zirkuliert. Falls parallel eine Trinkwarmwasseranforderung vorliegt, wird die Wärmepumpe aktiviert und zieht ihre Primärseite aus dem vom Durchlauferhitzer erwärmten Wasser.

Da der CUBE über kein TWW-System verfügt, entfallen hier die entsprechenden Zustände (Nummern 2, 3 und 7, siehe Anhang A.1.2). Bei der BTA wird über dieselbe Hydraulik Be- und Entladen, entsprechend interagieren hier beide Zustände und müssen bei den Betriebsarten berücksichtigt werden. Diese Betriebsarten sind in Bild 56 bis Bild 62 dargestellt. Während des Ladens Bild 56 und des Nachheizens (Bild 59) ist der Durchlauferhitzer (als Wärmequelle) aktiv und es muss auch die hydraulische Weiche durchströmt werden. Folglich kann die Trinkwarmwasserwärmepumpe, sollte sie aktiv sein, ihre Wärme (für die Primärseite) direkt aus der hydraulischen Weiche ziehen. Also ist in dieser Betriebsart für die TWW-Bereitung ohnehin eine Wärmequelle verfügbar, ohne dass die Anlage weitere Voraussetzungen erfüllen muss. Im Nachheizbetrieb muss folglich nicht noch einmal zwischen den Fällen mit und ohne TWW-Bereitung unterschieden werden.

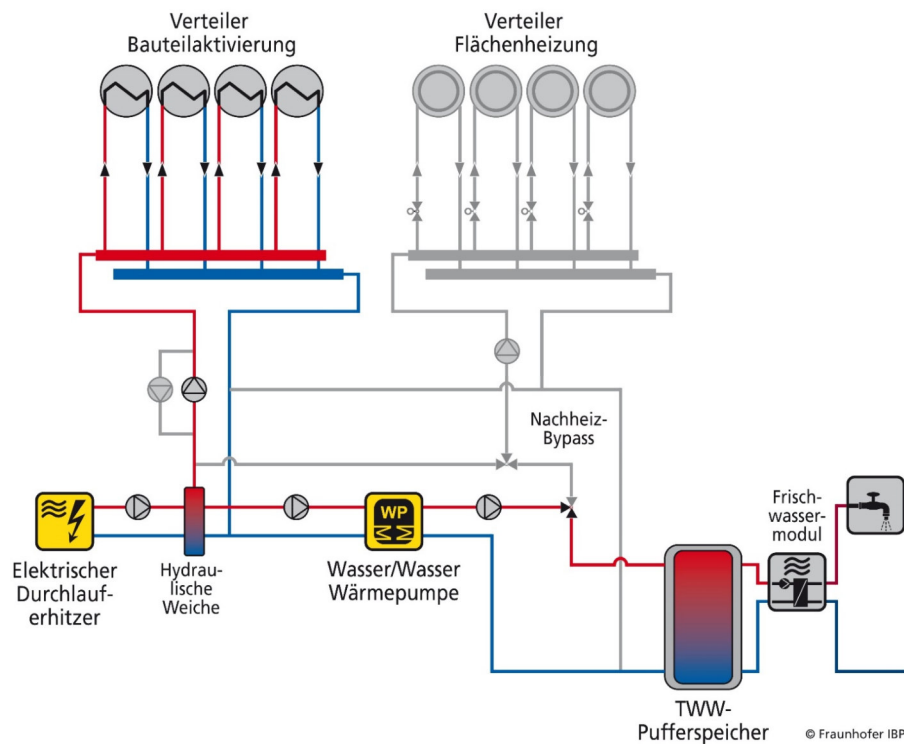


Bild 56:
Betriebszustand „Laden“ bei den BTA-Speichern.

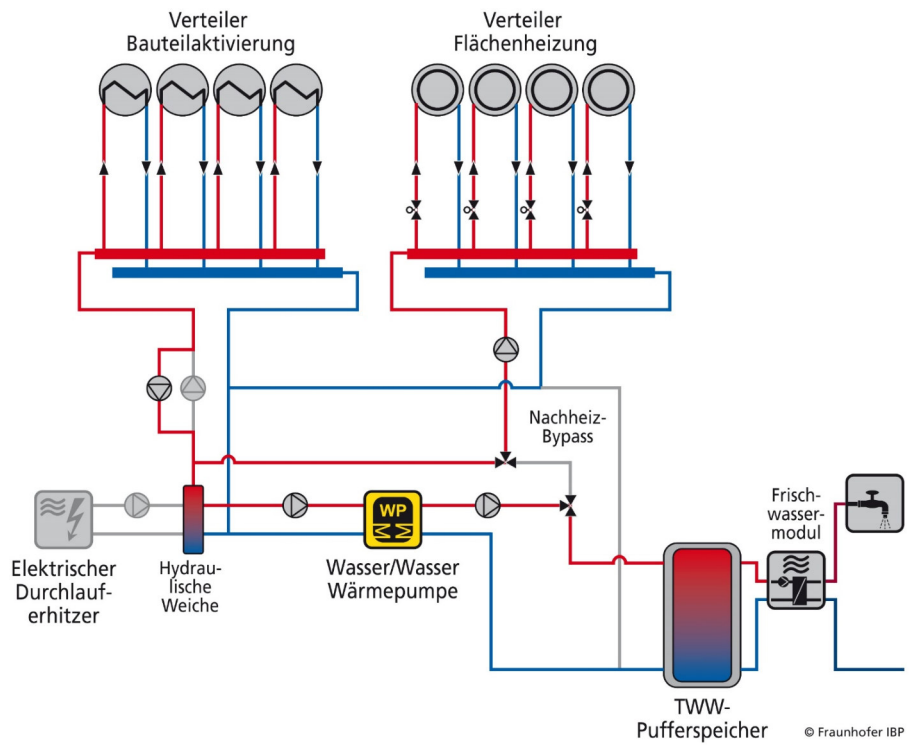


Bild 57:
Betriebszustand „Aktives Entladen“ bei den BTA-Speichern.

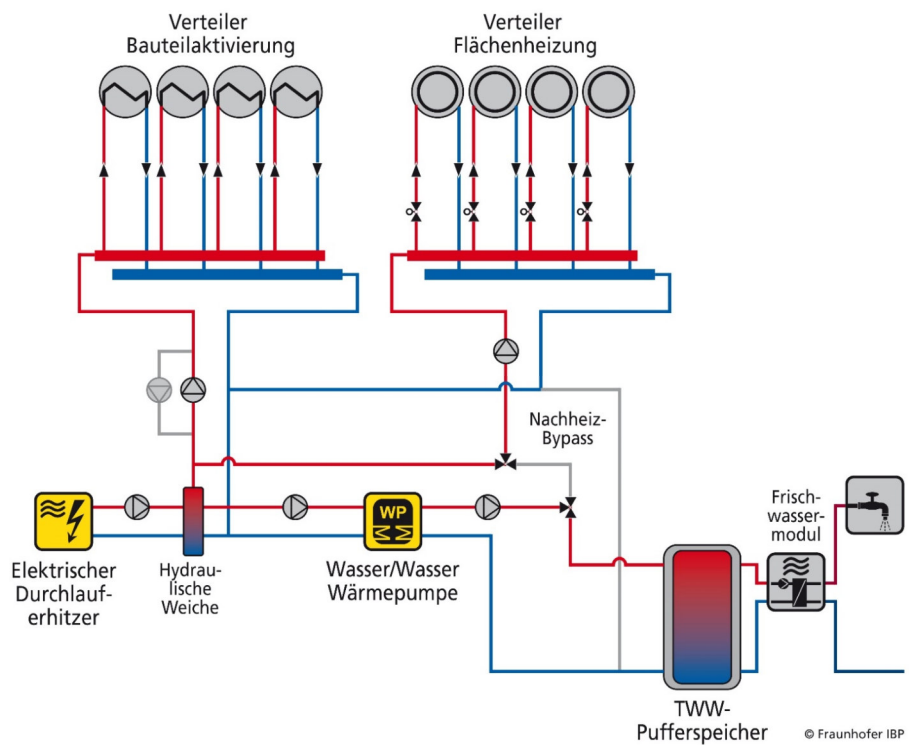


Bild 58:
Betriebszustand „Laden + Nachheizen“ bei den BTA-Speichern.

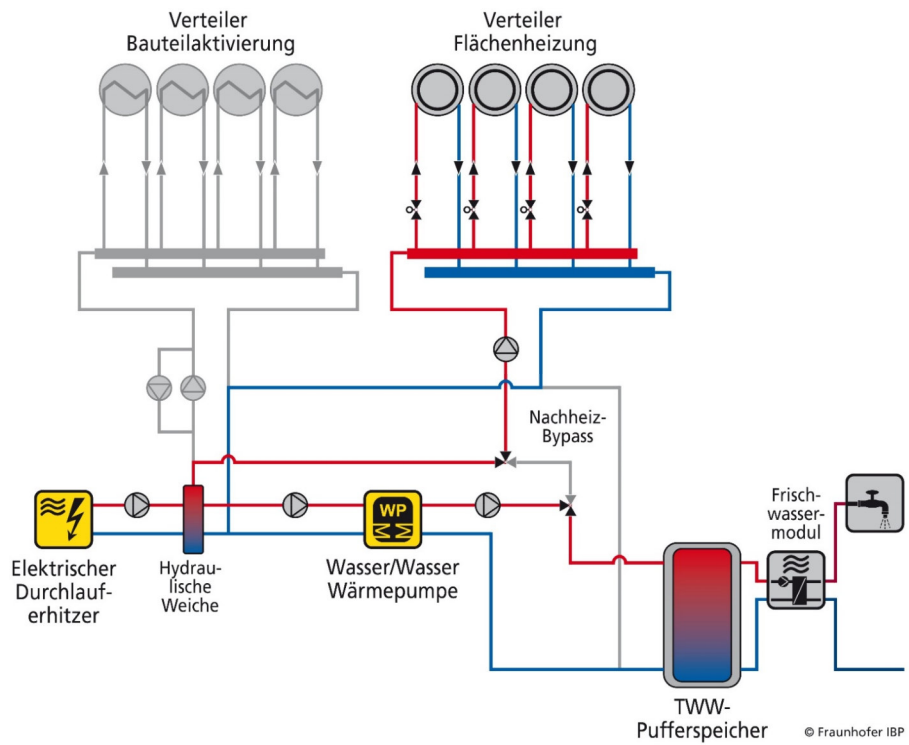


Bild 59:
Betriebszustand „Nachheizen, Direktstrom“ bei den BTA-Speichern. (obsolet)

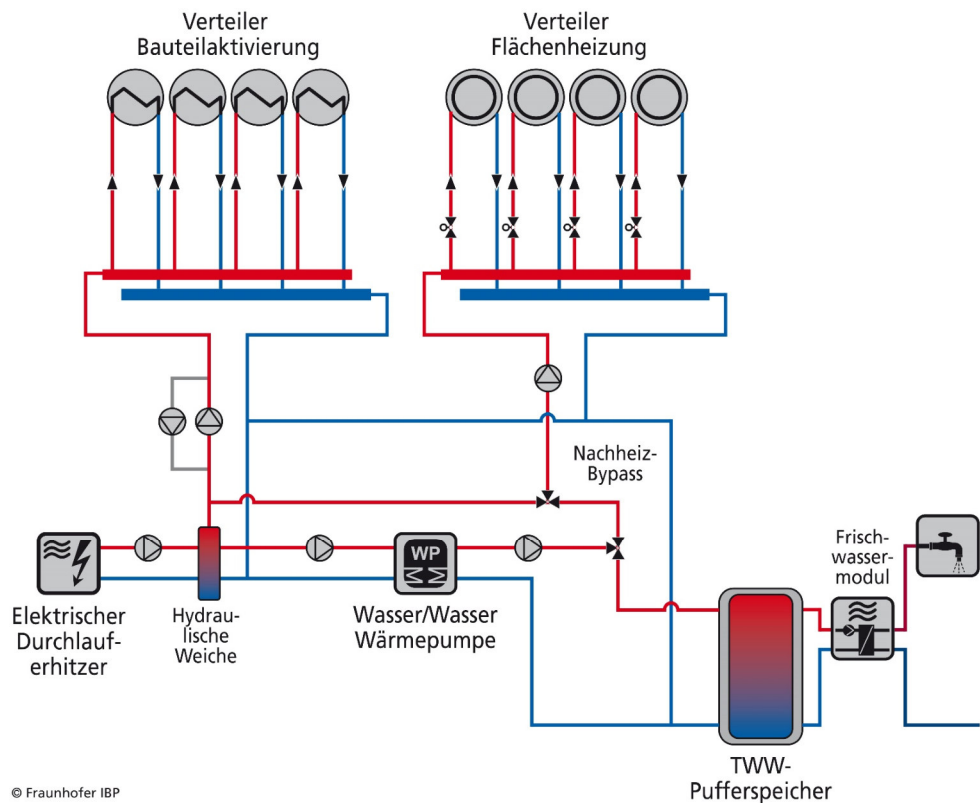


Bild 60:
Betriebszustand „Nachheizen mit Wärmepumpe“ bei den BTA-Speichern.

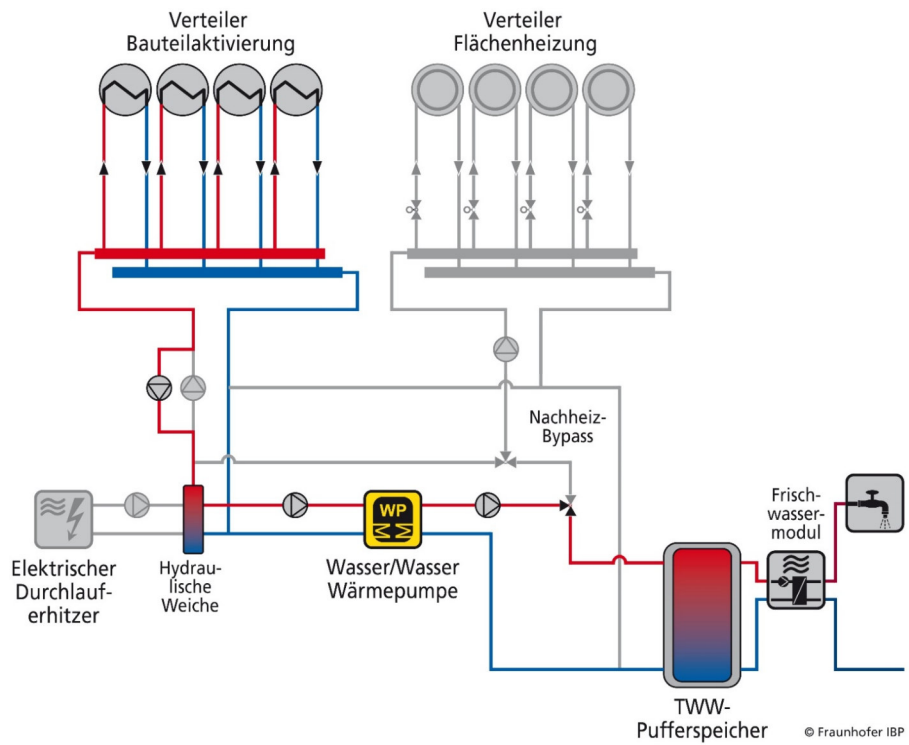


Bild 61:
Betriebszustand „TWW im Winter“ bei den BTA-Speichern.

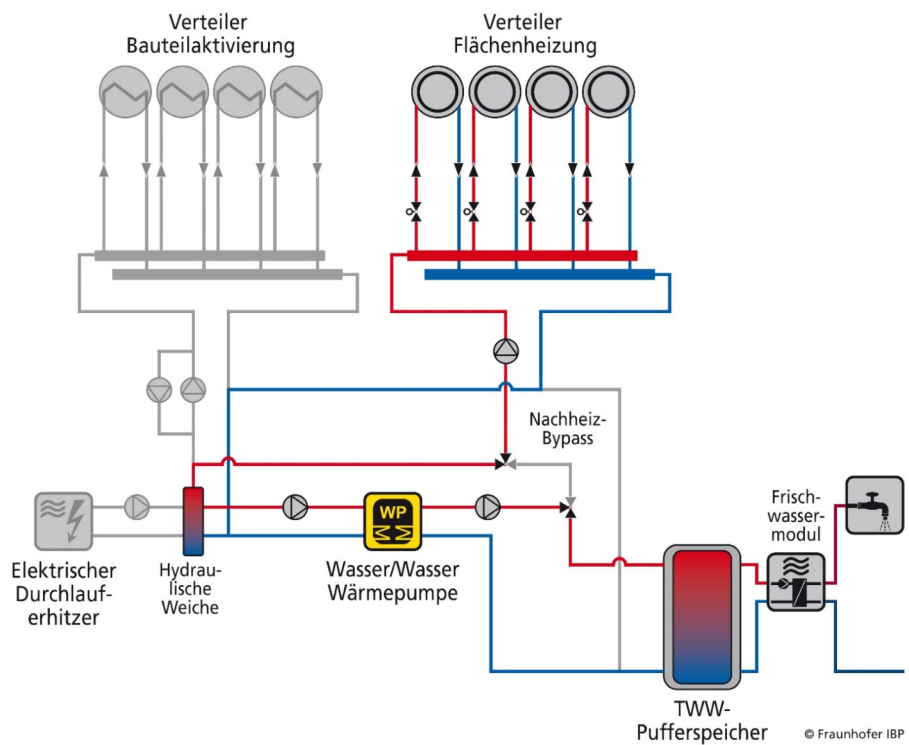


Bild 62:
Betriebszustand „TWW im Sommer“ bei den BTA-Speichern.

Wasserbasierter Wärmespeicher (WWS)

Für den Windperiodenspeicher (WWS) (Großer Warmwasser- bzw. Pufferspeicher) wurde ebenfalls das in Anhang A.1.3 zusammengefasste Betriebszustandskonzept erstellt. Beim WWS kann jederzeit Trinkwarmwasser bezogen werden. Wenn die Speichertemperatur des WWS nicht mehr ausreicht, um die gewünschte TWW-Temperatur zu erreichen, wird diese im Durchlaufkonzept entsprechend angehoben. Beim WPS gibt es die folgenden Betriebsarten:

- **Laden:**
Beim Laden wird der WWS über den (großen, leistungsstarken) Durchlauferhitzer beladen.
- **Nachheizen:**
Hier wird der Heizkreis der Flächenheizungen, unter Ausschluss des WWS, zirkuliert und im Durchlaufkonzept auf die Vorlauf-Solltemperatur erwärmt. Der WWS wird ausgeschlossen, da sonst mit Reststrom erwärmtes Wasser über den Heizungsrücklauf den WWS beladen würde.
- **Laden und Nachheizen:**
Hier wird parallel zum Laden der Heizkreis der Flächenheizungen, unter Ausschluss des WWS, zirkuliert und im Durchlaufkonzept auf die Vorlauf-Solltemperatur erwärmt.
- **Aktives Entladen:**
Hier wird die Flächenheizung aus dem WWS erwärmt.

Bild 63 zeigt das dazugehörige hydraulische Schema. Eine ggf. vorhandene solarthermische Anlage kann klassisch und unabhängig vom Windheizung 2.0-Konzept betrieben und geregelt werden. Diese WWS-Regelung wird nach Abschluss der Versuche, basierend auf den Erfahrungen mit dem HTSS und den BTA-Speichern, nochmals überarbeitet.

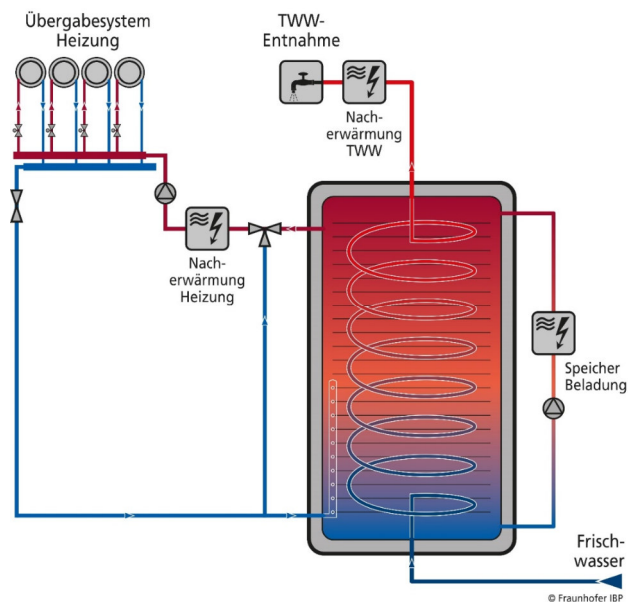


Bild 63:
Schematische Darstellung des Hydraulikkonzepts des Wasserbasierten Wärmespeichers (WWS).

2.3.6 Optimierte Teilbeladungssimulation

Der reale Speicher wird nicht immer zwangsweise bei vorhandenem Windstrom voll beladen, sondern z.B. in der Übergangszeit nur teilbeladen, um ungewünschte Wärmeverluste des Speichers zu minimieren bzw. in einer für das Gebäude nutzbaren Höhe zu begrenzen und besonders bei BTA-Systemen Überhitzungen der Räume zu vermeiden.

Die optimierte Teilbeladungssimulation wird mit einer Iteration über mehrere Simulationsläufe umgesetzt. Das Gebäudemodell wird in n-beliebigen Durchgängen mit angepasstem Ladepuls-Profil simuliert. Ein Zusatzprogramm zur Gebäudesimulationssoftware steuert dabei die Simulationen und übernimmt die notwendigen Schritte der iterativen Optimierung der Speicherladung. Im ersten Durchgang wird das verfügbare Ladepuls-Profil vollständig angesetzt und somit jeder mögliche Windstrom genutzt, um den Speicher zu beladen, sofern dieser nicht bereits voll beladen ist. Der Speicher ist damit dem Profil folgend maximal beladen, unberücksichtigt, dass das Gebäudeprognosemodell die Beladung möglicherweise gestoppt hätte, wenn ein geringer Wärmebedarf vorhergesagt worden wäre. Nach der ersten Simulation (dem 1. Lauf) ist der Wärmebedarf des Gebäudes zu jedem Zeitschritt simuliert und daher bekannt. Der Iterations-Algorithmus verwendet den berechneten Wärmebedarf jedes Zeitschritts und berechnet damit ein optimiertes Ladepuls-Profil, mit dem die Simulation erneut durchgeführt wird. Eine mögliche Beladung wird ignoriert, wenn durch diese die gespeicherte Wärme den künftigen Bedarf übersteigt. Nach dem zweiten Lauf (der ersten Iteration) wird das Verfahren erneut angewendet, mit dem erneut berechneten Wärmebedarf des Gebäudes aus dem zweiten Lauf. Dieser ändert sich, da z.B. der Windheizungsspeicher als innere Wärmequelle durch eine geringere Beladung weniger passive Speicherentladung bzw. interne Wärmegewinne liefert. Die Iteration wird solange durchgeführt, bis entweder die maximal eingestellten Iterationen, aktuell 4 Durchläufe, erreicht sind, oder sich das Ladeprofil nicht mehr ändert. Die Berechnung eines neuen Ladeprofiles ist in Bild 64 als Flussdiagramm dargestellt und folgend beschrieben.

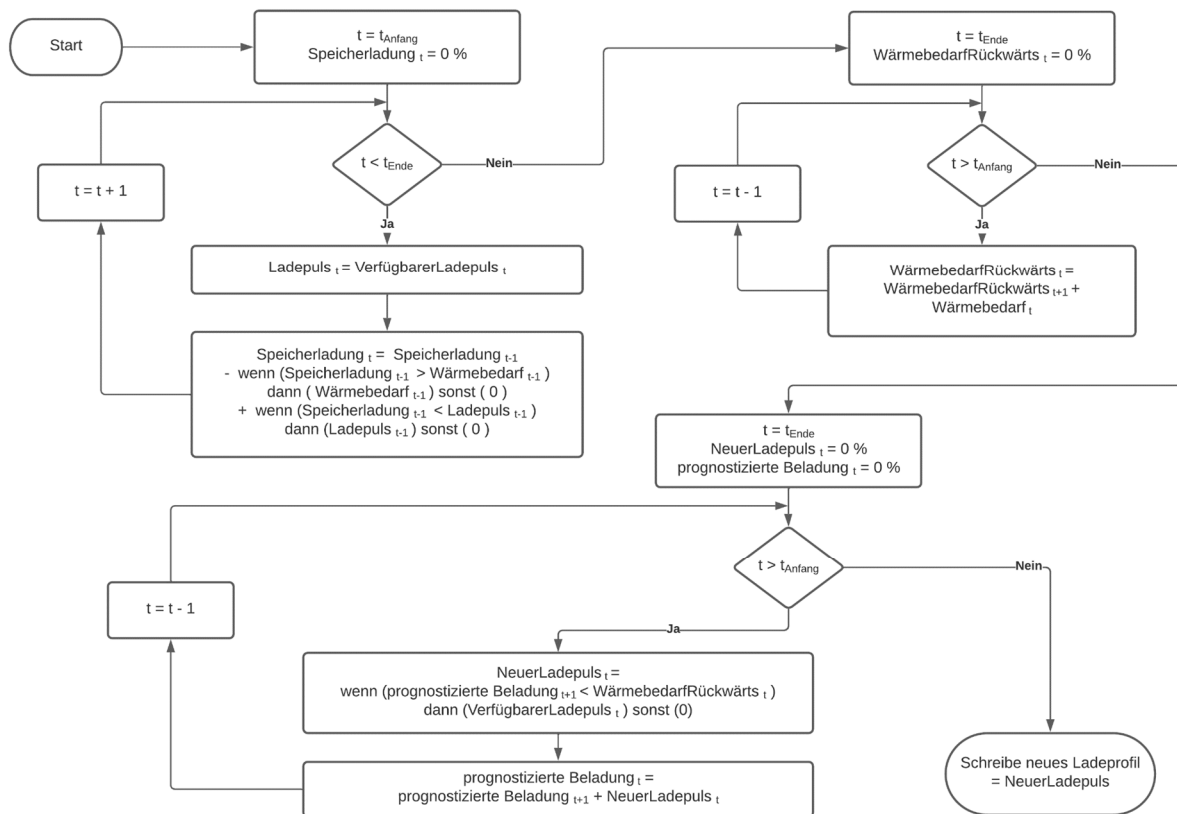


Bild 64:
Berechnungsalgorithmus für die Beladungsoptimierung im Rahmen der dynamischen Simulationen.

Die Berechnung des optimierten Ladepuls-Profiles erfolgt durch Rückwärts-Rechnung. Dafür wird zuerst der Wärmebedarf in umgekehrter Reihenfolge, also von Simulationsende zum Simulationsanfang zu jedem betrachteten Zeitschritt kumuliert. Dies ist dargestellt auf Bild 65. Ein neuer Ladepuls zum Zeitpunkt t wird berücksichtigt, wenn die prognostizierte Beladung des Speichers zum Zeitpunkt $t+1$, also im nächsten Zeitschritt, kleiner als der Wärmebedarf zum Zeitpunkt $t+1$ ist. Die prognostizierte Beladung des Speichers wird dabei ebenfalls in umgekehrter Reihenfolge kumuliert (ebenfalls Bild 65).

Ist demnach im nächsten Zeitschritt ein Ladepuls notwendig und ist dies nach dem zu Grunde liegenden Windstrom-Ladeprofil möglich, wird der neue Ladepuls weiterhin berücksichtigt. Würde der Ladepuls den Bedarf in der Zukunft übersteigen, wird er zu diesem Zeitschritt nicht weiter berücksichtigt. Die Speicherladung selbst wird zum Zeitpunkt t mit der Speicherladung zum Zeitpunkt $t+1$ und dem aktuell berechneten neuen Ladepuls berechnet.

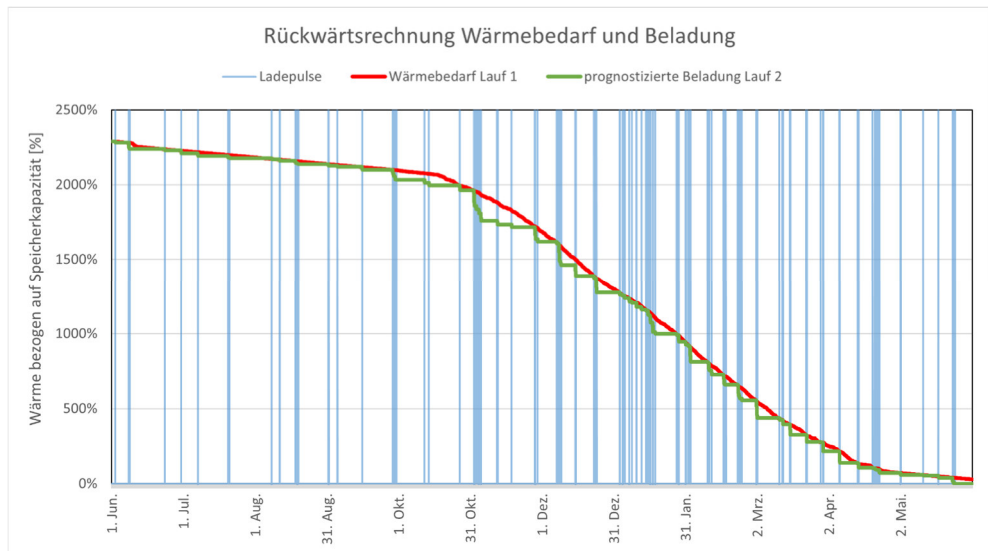


Bild 65:
Rückwärtsrechnung von Wärmebedarf und prognostizierter Beladung, zur Ermittlung des optimierten Ladeprofils.

Bild 66 zeigt den Verlauf des Speicher-Ladezustands in Prozent einer Jahressimulation nach 3 Durchläufen, bzw. 2 Iterationen. Erkennbar ist die maximale Beladung nach dem 1. Lauf (braun), bei dem jeder Ladepuls verwendet wird. Mit der 1. und 2. Iteration (grün und rot) wird der Speicher nicht voll beladen, sondern der Ladezustand optimiert auf den nachfolgenden Bedarf. Dargestellt ist eine Anfangsladung des Speichers von 30 Prozent.

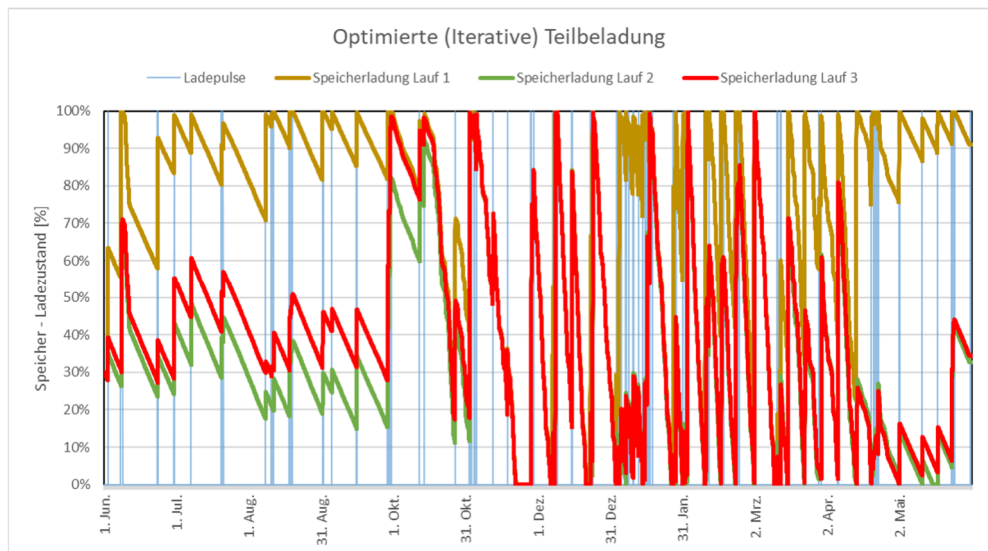


Bild 66:
Darstellung Speicher-Ladezustand einer Jahressimulation mit 2 Iterationen.

2.4 Vorversuche

Die Vorversuche dienen dazu, grundsätzliche Hardware-Probleme während der aufwendigen Freiland-Versuche an den Zwillingshäusern zu vermeiden, so dass sich die Haupt-Versuchsreihe auf das Regelungsverhalten konzentrieren kann.

2.4.1 Simulation des HTSS und Kleinversuch

Eine zentrale Fragestellung bei der Entwicklung des HTSS ist, ob der Steinkern in den kurzen Beladephase vollständig die entsprechende Wärmemenge aufnehmen kann oder ob zwischen den Heizstäben kühle Steinbereiche verbleiben. Andererseits muss für die Auslegung eines HTSS bekannt sein, bei welcher Steintemperatur und bei welchen Luftgeschwindigkeiten welche Energiemengen bzw. Temperaturniveaus entnommen werden können. Hierzu werden mehrere Be- und Entladezyklen mit der Software Voltra (Physibel), einem thermischen 3d Finite Elemente Programm, instationär berechnet, um die entsprechenden Kennlinien für den Speicher zu ermitteln. Mit Hilfe dieser Simulationen kann die notwendige Sicherheit gewonnen werden, dass das gewählte Steinformat die richtigen Abstände zwischen den einzelnen Heizstäben bzw. den einzelnen Luftkanälen aufweist, um den gewünschten Betrieb eines HTSS zu ermöglichen.

Eine kritische Annahme beim HTSS-Design sowie diesen Simulationsrechnungen ist der Wärmeübergang zwischen den Heizstäben und dem Speicherstein bzw. zwischen dem Speicherstein und den Luftkanälen. Um diese Annahmen im Simulationsmodell zu validieren, wird ein Kleinversuch mit einer einzelnen Heizwendel und etwa 5 Prozent des angestrebten Speichervolumens gebaut und messtechnisch untersucht. Die durchgeführten Versuche an dem Kleinprüfling werden als Validierung des späteren Gesamtmodells ebenfalls simuliert, auf Abweichungen überprüft und falls erforderlich entsprechend kalibriert. Der Aufbau des Kleinversuchs ist in Bild 67 und Bild 68 dargestellt. Die Messungen wurden Anfang Juli 2019 durchgeführt. Da die notwendigen Pressformen beim Aufbau des Kleinversuchs noch nicht zur Verfügung standen, wurde statt des geplanten Steinmaterials „Suprath A 40-t“ der Feuerbeton „Carath 1400 LC-10“ verwendet. Die abweichenden Materialeigenschaften wurden in der Simulation des Kleinversuchs entsprechend berücksichtigt.

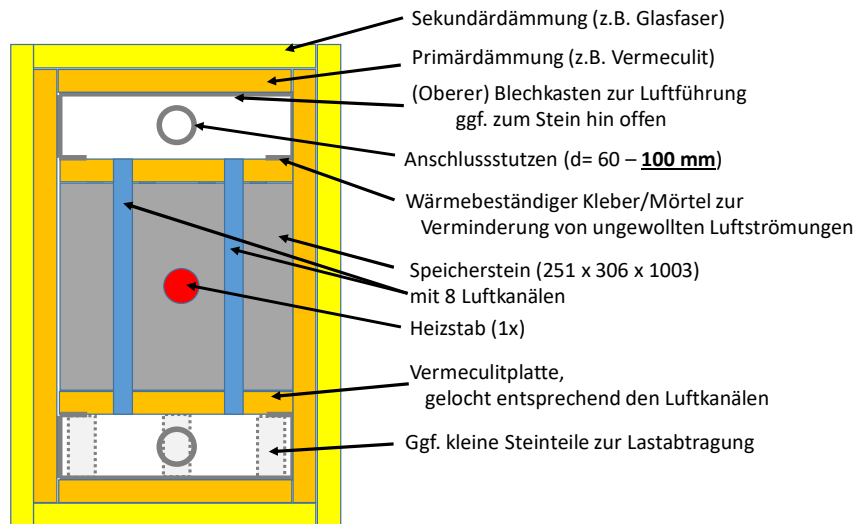


Bild 67:
 Systemskizze des Versuchsaufbaus.



Bild 68:
 Fotos des realen Aufbaus des Kleinversuchs:
 Links der fertige Kleinversuch. Rechts die Luftführungs-Steine im Aufbau.

Bild 69 zeigt den HTSS-Kleinversuch während einer Messung ohne aktive Entladung, also ohne Ventilator und Messtechnik zur Luftströmungsmessung. Es werden 10 Versuchszyklen gefahren. Diese Versuchszyklen unterscheiden sich zum einen durch die Solltemperaturen der Heizwendel während der Beladung (800 – 1000 °C) und zum anderen bezüglich des Luftvolumenstroms der aktiven Entladung (8 – 72 Nm³/h oder rein passive Entladung) (Nm³ = Norm-m³). Tabelle 13 zeigt eine Übersicht über die durchgeführten Versuchszyklen und deren Ergebnisse. Bild 70 zeigt beispielhaft den Temperaturverlauf im Speicher-

kern während des Beladens und des aktiven Entladens im Rahmen des 9. Versuchs. Man kann erkennen, dass sogar bei dem relativ ungünstigen Verhältnis von Oberfläche zu Kernvolumen die gewählte Heizwendel- und Steingeometrie nach 10 Stunden ca. 500 °C erreichen kann. Die in Abschnitt 2.1.6 beschriebene Simulation für den HTSS in Realgröße zeigt, dass die erforderlichen Kerntemperaturen bei realen, günstigeren Geometrie erreicht werden.



Bild 69:

Kleinversuch im Technikum des Fraunhofer IBP in Stuttgart während einer Messung ohne aktive Entladung (ohne Ventilator, Messtechnik zur Luftströmungsmessung):

Links als fotografische Darstellung, rechts als Falschfarben Wärmebild.

Tabelle 13:
Übersicht über die Versuchszyklen am HTSS-Kleinversuch.

| Nr. * | Aufladung/Speicherung | | | | Entladung des Speichers | | | | Energie | |
|----------|-----------------------|---------------------------|------------|-----------------------------|-------------------------|-------------|-----------------------------|-----------------------|--|----------------|
| | Aufladezeit | Heizwendel- Temperatur | Anfahrzeit | Temperatur nach Beladung | Art der Entladung | Entladezeit | Unterdruck bei Entladung | Luftvolumen- strom | Elektrische Ener- gie (Beladung) | akt. Entladung |
| | [h] | [°C] | [h] | [°C] | [-] | [h] | [Pa] | [Nm ³ /h] | [kWh] | [kWh] |
| 1 | 45 | 800 | 8 | 661 | Passiv | ---- | ---- | ---- | ---- | ---- |
| 2 | 45 | 800 | 8 | 663 | Passiv | 191 | 0 | ---- | ---- | ---- |
| 3 | 45 | 800 | 8 | 634 | Aktiv | 94 | 10 | 8 | 56 | 37 |
| 4 | 45 | 800 | 8 | 613 | Aktiv | 33 | 50 | 23 | 56 | 30 |
| 5 | 45 | 800 | 4 | 629 | Aktiv | 30 | 50 | 20 | 58 | 31 |
| 6 | 45 | 800 | 1 | 630 | Aktiv | 51 | 50 | 26 | 59 | 31 |
| 7 | 34 | 1000 | 3 | 820 | Aktiv | 32 | 100 | 62 | 68 | 40 |
| 10 | --- | 900 | 1 | 758 | Aktiv | 27 | 100 | 72 | 65 | 36 |

*: Die Versuchsnummern 8 und 9 waren fehlerhaft und werden nicht ausgewertet.

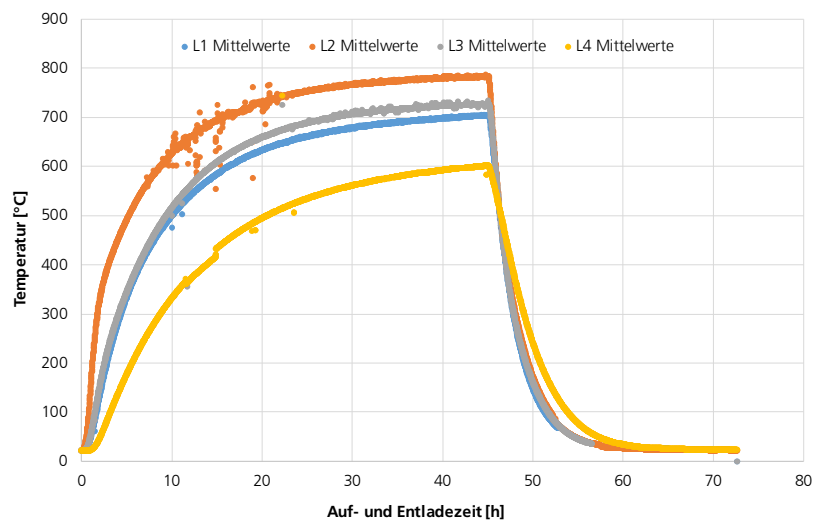


Bild 70:
Verlauf der mittleren Temperaturen der 4 Steinlagen L1 bis L4 des Speicherkerns während des Versuchs Nr. 10.

Ein weiterer für die Funktionsweise des HTSS wichtiger Parameter ist die aktive Entladung, also bei welcher verbleibenden Kerntemperatur und welchem Luftvolumenstrom noch welche Energiemengen und Temperaturniveaus entnommen werden können. In Bild 71 sind die Messdaten der Kleinversuche mit aktiver Entladung dahingehend ausgewertet.

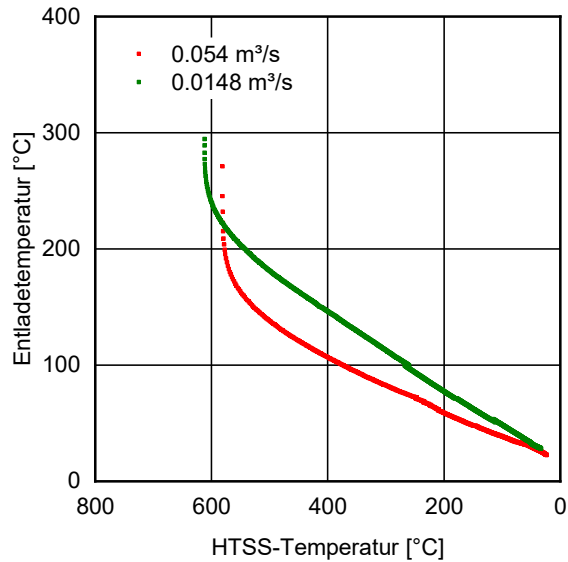


Bild 71:
Resultierende Entladetemperaturen für den HTSS-Kleinversuch in Abhängigkeit von der Speicherkerntemperatur für zwei unterschiedliche Luftvolumenströme der aktiven Entladung.

Primär dient der Kleinversuch dazu, die Annahmen zu den Wärmeübergängen zwischen Heizwendel und Stein für die Simulation abzusichern. Hierzu wird der Temperaturverlauf im Speicherkern während des Experiments nachsimuliert und der Wärmeübergang so lange kalibriert, bis eine ausreichende Übereinstimmung erreicht ist. In Bild 72 kann man erkennen, dass die simulierten und die gemessenen Temperaturen im Steinkern nach Abschluss dieser Kalibrierungen eine gute Übereinstimmung zeigen. Die so gewonnenen Modellierungsparameter dienen als Grundlage für die in Abschnitt 2.1.6 beschriebenen Simulationen eines HTSS in Realgröße.

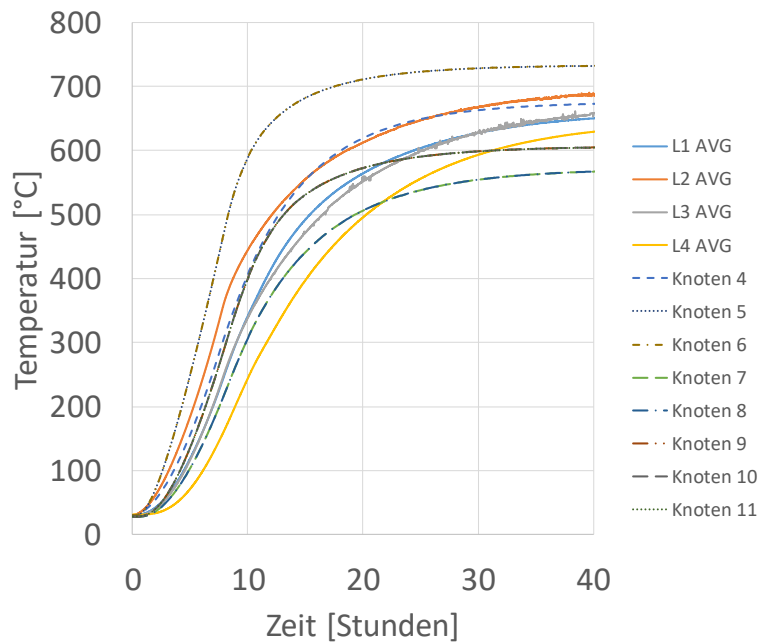


Bild 72:
Verlauf der gemessenen und simulierten Steintemperaturen während der Beladung. Die vier durchgezogenen Linien („L_ AVG“) repräsentieren die gemessenen mittleren Temperaturen in den vier Lagen des HTSS-Kleinversuchs, die gestrichelten „Knoten“ repräsentieren simulierte Temperaturen an unterschiedlichen Stellen des Modells des Kleinversuchs.

2.4.2 Aufbau Vorversuch BTA-Speicher

Zur Validierung der bisher verwendeten Simulationsmodelle wird jeder der vier betrachteten BTA-Speicher in Form eines ca. 9 m² großen Prüflings am Fraunhofer IBP Holzkirchen aufgebaut und messtechnisch untersucht (33 m² bei der Sanierungsdecke). Hierbei liegt der Untersuchungs- bzw. Validierungs-Fokus auf dem ungestörten 1-dimensionalen thermisch-energetischen Verhalten in der Bauteilmitte.

Die Neubau-Decke wird, wie in Bild 73 und Bild 74 dargestellt, im Technikum des Fraunhofer IBP bei Holzkirchen auf zwei Überseecontainer aufgelegt. Der dadurch unter der Decke entstehende „Raum“ wird durch den gedämmten Fußboden, die gedämmten Containerwände, den Prüfling der Neubau-Wand und eine Folien-Wand begrenzt. Alle Oberflächentemperaturen der Umschließungsflächen und die Lufttemperatur in diesem Raum werden dabei messtechnisch erfasst. Um der Oberseite der Neubau-Decke einen definierten Strahlungspartner gegenüber zu stellen, wird oberhalb der Decke eine IR-opake Folie gespannt (Abstand Decke/Folie 0,5 m), deren Temperatur ebenso gemessen wird wie die Lufttemperatur im entsprechenden Zwischenraum. Die Messstellen im und am Prüfling der Neubau-Decke selbst sind in Bild 75 dargestellt. Die Neubau-Wand ist, wie bereits erwähnt, Teil der Wände des unteren „Raums“ und wird im Zuge desselben Aufbaus untersucht. Analog der dem „Raum“ abgewandten Seite der Decke wird der Neubau-Wand eine IR-opake Folie als

Strahlungspartner gegenübergestellt. Die entsprechenden Messstellen in und an diesem Prüfling sind in Bild 76 dargestellt; diverse Aufbausituationen zeigt Bild 77.

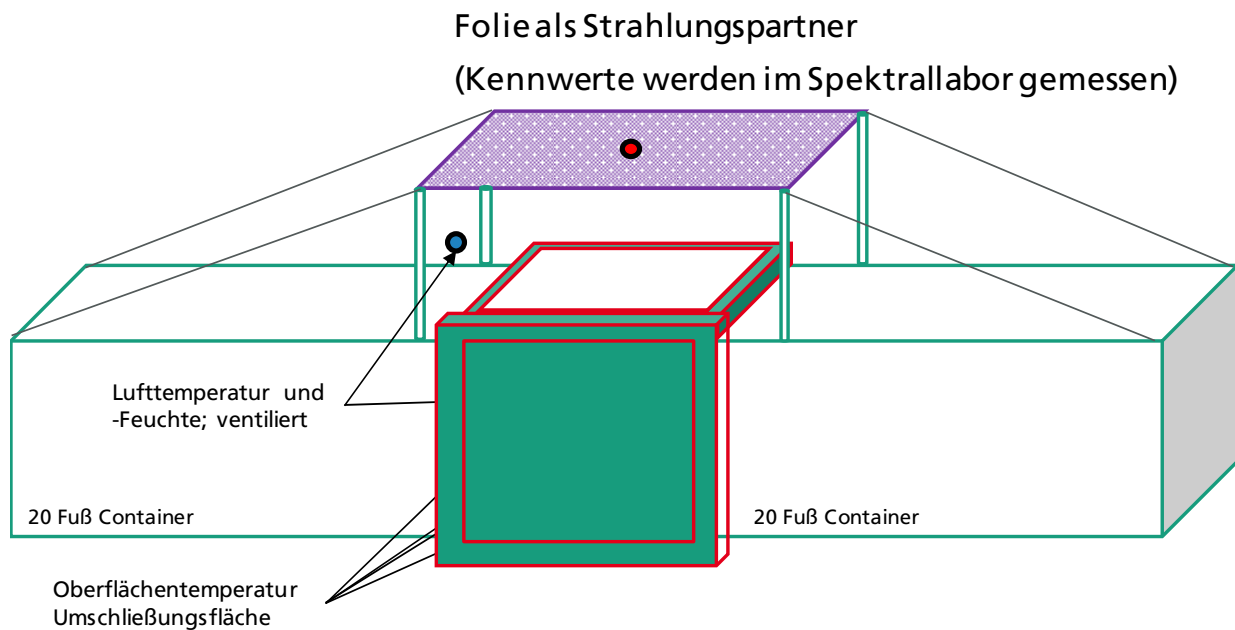


Bild 73:
Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus für die Validierungsmessung der Neubau-Decke und –Wand im Technikum des Fraunhofer IBP.



Bild 74:
Links: Neubau-Decke während des Sensoreinbaus vor dem Betonieren im Fertigteilwerk von Concrete Rudolph.
Rechts: Neubau-Decke auf und Neubau-Wand vor den Übersee-Containern im Technikum des Fraunhofer IBP.

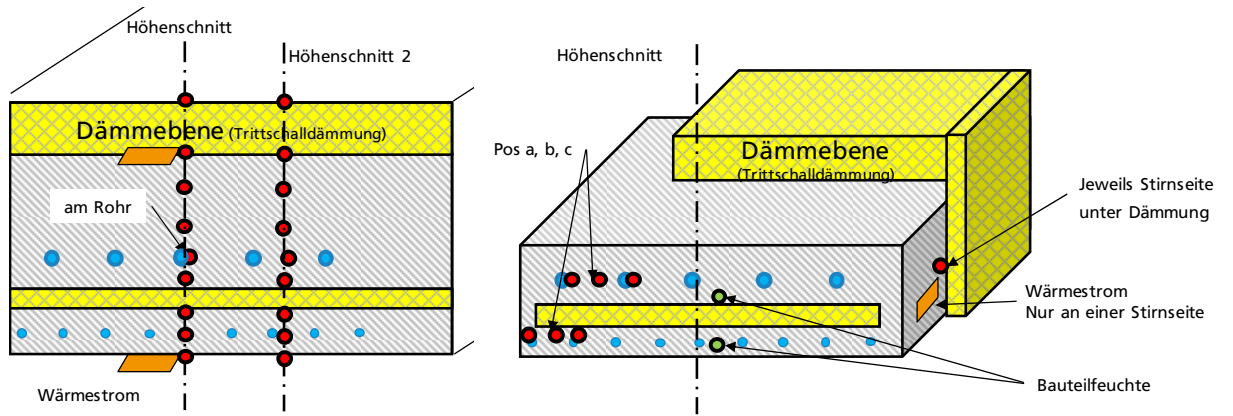


Bild 75:
(Temperatur-)Messstellen in der Neubau-Decke (Vertikalschnitt).

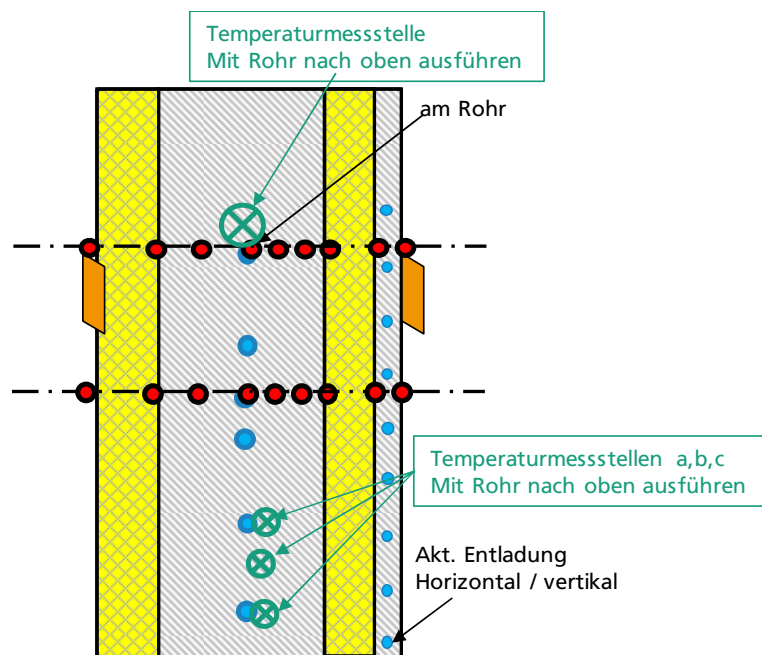


Bild 76:
(Temperatur-)Messstellen in der Neubau-Wand (Horizontalschnitt).



Bild 77:
 Neubau-Wand (Kalksandstein) während des Aufbaus im Technikum:
 Links: Sensoren zur Ermittlung der Temperaturverteilung über den Wandquerschnitt (siehe Bild 76).
 Mitte: Eingebrachtes KS-XK-Wandtemperierungssystem.
 Rechts: Ansicht des Systems zur aktiven Entladung (KlimaSan), ohne Trockenbauabschluss.

Die Prüflinge der Sanierungslösungen für Decke und Wand werden in einem der Zwillingshäuser (N2) des Fraunhofer IBP auf dem Freilandversuchsgelände bei Holzkirchen realisiert. Wie in Bild 78 zu erkennen, wird die Sanierungs-Decke über dem im Erdgeschoss gelegenen Wohnzimmer und die Sanierungs-Wand im Erdgeschoss in der Trennwand zwischen Bad und Schlafzimmer eingebaut. Die in die Sanierungs-Decke eingebrachte Sensorik ist in Bild 79 schematisch dargestellt. In Bild 80 ist die Decke während des Einbaus und im fertigen Zustand abgebildet. Bild 81 zeigt schematisch die eingebauten Messstellen in der Sanierungs-Wand, in Bild 82 ist die Wand während des Aufbaus abgebildet.

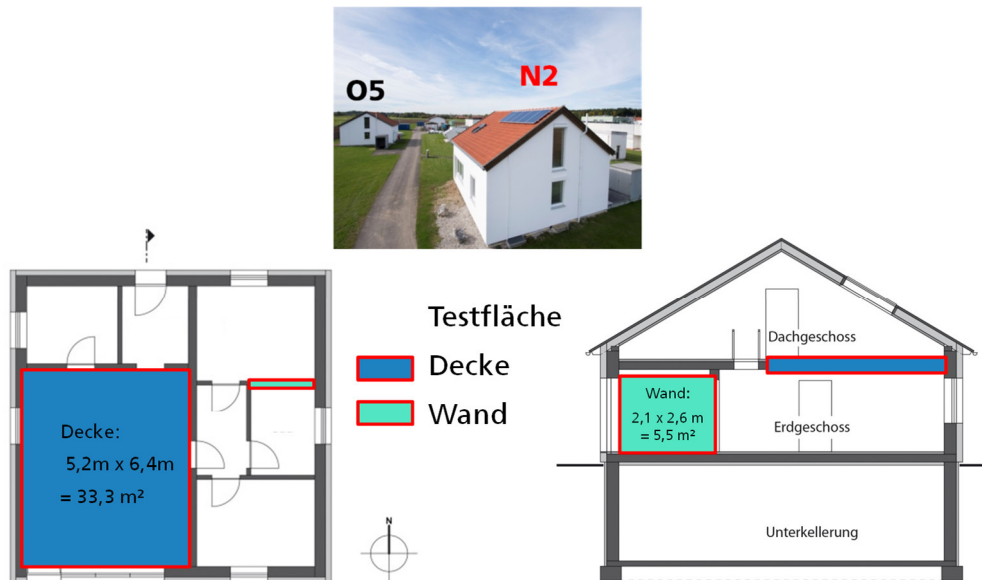


Bild 78:
Darstellung der Position der Sanierung-Wand und –Decke im N2-Zwillingshaus des Fraunhofer IBP.

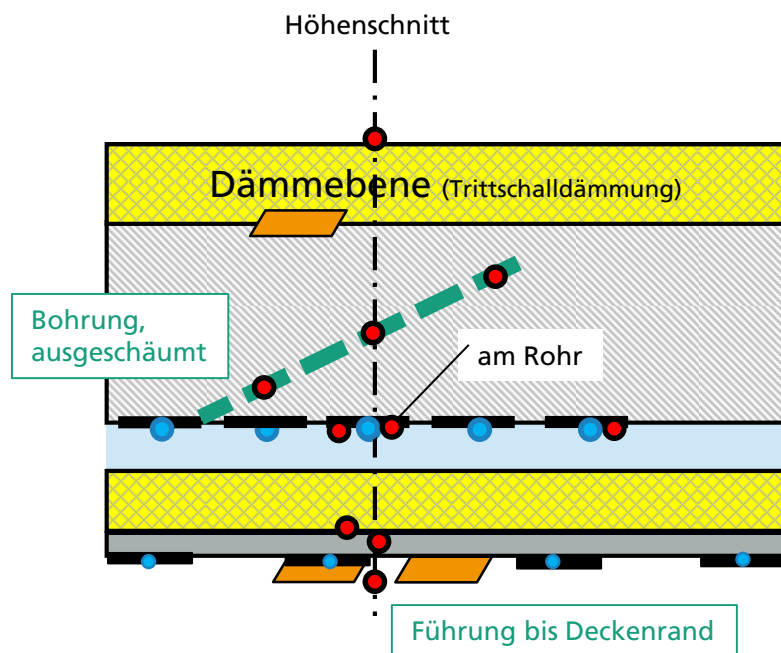


Bild 79:
(Temperatur-)Messstellen in der Sanierungs-Decke (Vertikalschnitt).
Die Wärmefluss-scheibe im DG befindet sich an der Grenzschicht Betondecke/Dämmung. Hier ist ebenfalls ein Temperatursensor eingebaut.



Bild 80:
 Eingebaute Sanierungsdecke im N2-Zwillingshaus des Fraunhofer IBP:
 Links im geöffneten Zustand mit den blanken Aluminium-Lamellen des BTA-Speichers und den weißen Profilen der aktiven Entladung.
 Rechts im geschlossenen Zustand; die Gipskartonplatten verdecken bzw. tragen die Calostat-Dämmplatten.

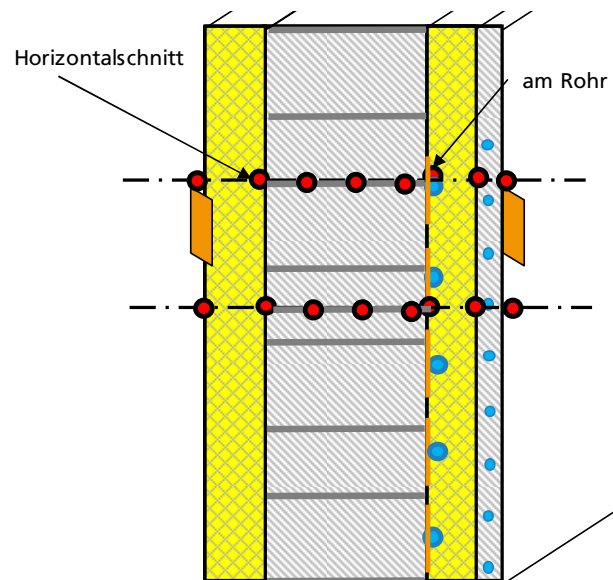


Bild 81:
 (Temperatur-)Messstellen in der Sanierungs-Wand (Vertikalschnitt).



Bild 82:
 Sanierungs-Wand während des Aufbaus im N2-Zwillingshaus des Fraunhofer IBP:
 Links: Lamellen zur Be- und Entladung des BTA-Speicher (ohne Verrohrung).
 Rechts: System der aktiven Entladung (KlimaSan) vor Montage der Trockenbauverschalung.

2.4.3 Hydraulische Anbindung der Prüflinge

Die hydraulische Anbindung dient dazu, die Beladung und die aktive Entladung der BTA-Speicher Prüflinge zu realisieren. Die in Bild 83 dargestellte Anbindung des jeweiligen Decken- und Wand-Prüflings ist prinzipiell im Technikum und im Zwillingshaus N2 identisch ausgeführt. Als Wärmequelle dient ein 200 l Pufferspeicher mit einer 4,5 kW Heizwendel. Im Zwillingshaus ist dieser Aufbau um eine 9 kW Heizwendel ergänzt, um für die Sanierungsdecke (33 m²) ausreichend Leistung zur Verfügung stellen zu können. Ein paralleles Beladen von Decke und Wand ist im Versuchsaufbau nicht möglich. Auf Grund der verhältnismäßig kurzen Beladezeiten, im Vergleich zur Entladung, stellt dies jedoch keine nennenswerte experimentelle Einschränkung dar. Jeder der beiden Heizkreise (Wand- und Deckenprüfling) verfügt dabei über ein 3-Wege-Ventil, welches es ermöglicht, über eine Rücklaufbeimischung die geplanten Vorlauftemperaturen von 55 °C – 80 °C einzuregulieren (bei den beiden Neubau-BTA-Systemen zu Beginn 45 °C). Da im Entladungsmodus die hydraulischen Kreise beider Prüflinge vollständig voneinander getrennt sind und auch über separate Pumpengruppen für die Entladung verfügen, können die aktiven Entladungen unabhängig vom Betriebsmodus des jeweiligen anderen Prüflings erfolgen. Beim alternierenden

Nachheizen (siehe Abschnitt 2.4.4) werden die Verrohrungen der aktiven Entladungen zyklisch (im Aus/An-Betrieb) mit warmem Heizungswasser durchströmt. Die in Bild 83 dargestellte Anordnung erlaubt es, die BTA-Speicher der Prüflinge sowohl zu beladen als auch über einen hydraulischen Kurzschluss mit dem oberflächennahen Rohr-System aktiv zu entladen. Darüber hinaus ist es möglich, das oberflächennahe Rohr-System direkt aus dem Pufferspeicher zu beheizen (entspricht später dem Anwendungsfall "Nachheizen"). Sowohl die BTAs als auch die aktiven Entladungen verfügen über Messstellen für die Vor- und Rücklauftemperatur und den Volumenstrom. Dies erlaubt eine energetische Bilanzierung aller hydraulisch eingebrachten und entnommenen Energiemengen. In Bild 84 ist beispielhaft die hydraulische Versorgung der beiden Neubau-Prüflinge im Technikum abgebildet.

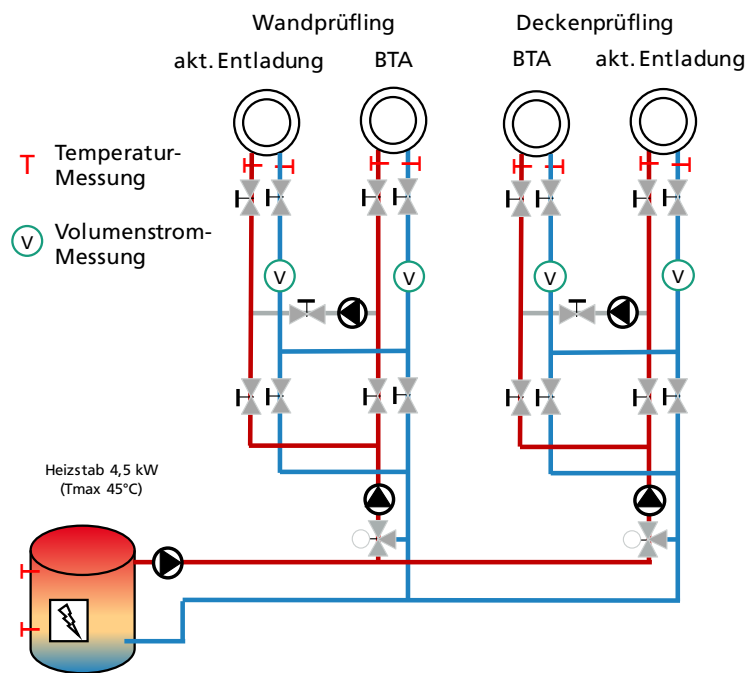


Bild 83:
Schematische Darstellung der hydraulischen Prüflingsversorgung.



Bild 84:
Fotografische Darstellung der hydraulischen Prüflingsversorgung im Technikum
des Fraunhofer IBP.

Neubau-Decke

In Bild 85 ist ein beispielhafter Verlauf eines Versuchs mit Beladung und anschließender aktiver Entladung der Neubau BTA-Decke dargestellt. Da zwischen 10:00 Uhr und 13:00 Uhr des zweiten Entlade-Tages die aktive Entladung für ein paar Stunden ausfällt, wird dieser Versuch in den Auswertungen nicht berücksichtigt. Er ist aber gut geeignet, um den Unterschied zwischen aktiver und passiver Entladung darzustellen. Während der passiven Entladung kann man deutlich erkennen, dass der Temperaturabfall im Betonkern (grün) deutlich verlangsamt stattfindet. Auch zeigt sich, dass zu Beginn der Beladung der ca. 9 m² großen Decke rund 4 kW Ladeleistung erreicht werden, welche sich gegen Ende der Beladung auf 1,2 kW reduziert (Temperaturdifferenz zwischen "Vorlauftemperatur Laden" und "Temperatur Betonkern" sinkt mit steigendem Speicherladegrad). Bei der aktiven Entladung ist ein ähnlicher Leistungsverlauf zu beobachten. Hier sinkt die Entladeleistung von anfangs 1,5 kW mit zunehmender Entladedauer bzw. sinkendem Speicherladegrad gegen Null.

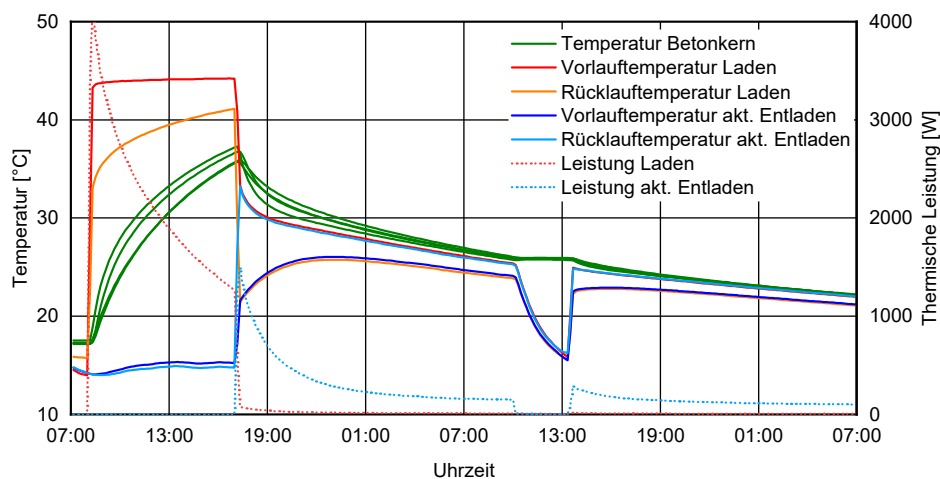


Bild 85:
Beispielhafter Verlauf der Be- und aktiven Entladungen der Neubau-Decke. Zwischen 10:00 Uhr und 13:00 Uhr des zweiten Entladetags wird die aktive Entladung unterbrochen, so dass eine passive Entladung vorliegt.

Die detaillierten Randbedingungen der einzelnen Versuchsläufe der Neubau-Decke sind in Tabelle 15 zusammengestellt. Oben in Bild 86 sind die be- und entladenen thermischen Energiemengen dargestellt. Die Höhe der gestapelten Balken repräsentiert hier die gesamte, während des Ladens ins Bauteil eingebrachte Energiemenge. Man kann erkennen, dass bei 9 Stunden Ladezeit bis zu 2,5 kWh/m² eingespeichert werden können. Bei einer Beladedauer von 4 Stunden werden bereits über 1,3 kWh/m² bzw. in etwa 50 Prozent der Energiemenge (100 % = 2,5 kWh/m²) erreicht. Im Versuch Nr. 1 wird ausschließlich passiv entladen, weshalb keine orangenen Balkenanteile aufgeführt sind, welche die aktive Entladung repräsentieren. Bei Versuchen mit aktiver Entladung stellt diese einen wesentlichen Anteil der abgeführten Energiemenge dar. Dies

spricht für eine gute Regelbarkeit des BTA-Systems hinsichtlich der Energieströme in den Raum mit Hilfe der aktiven Entladung. Die Randverluste werden über die Oberflächen der 4 Stirnseiten der Decke, multipliziert mit dem Messsignal der entsprechenden Wärmefluss Scheibe abgeschätzt. Die Änderung der inneren Energie des Speichermaterials (Betondecke) wird aus der Temperaturdifferenz vor Beginn und nach Ende der jeweiligen Messreihe unter Berücksichtigung der Wärmekapazität des BTA-Kerns ermittelt. Bei Versuch Nr. 7 wird die aktive Entladung alternierend betrieben. Dies bedeutet, dass die entsprechende Umwälzpumpe in einem 6 Stunden Zyklus abwechselnd aktiviert und deaktiviert wird. Entsprechend ist bei Versuch Nr. 7 zu erkennen, dass der orange(ne) Balken der aktiven Entladung im Verhältnis zur (grünen) passiven Entladung kleiner ist als bei den vorangegangenen Versuchen. Unten in Bild 86 sind die erreichbaren Beladeleistungen dargestellt. Die linken vier Versuche sind mit einer Vorlauftemperatur von 45 °C und einem Durchfluss von 45 l/(m²h) durchgeführt. Im Lauf der Systementwicklung stellte sich heraus, dass diese hohen Durchflüsse für ein System in der Größe eines realen Gebäudes zu sehr hohen Hilfsenergiemengen für die Umwälzpumpen führen würden. Um diesen unerwünschten Effekt zu reduzieren, werden die Durchflüsse für die restlichen drei, auf der rechten Seite dargestellten Versuche auf 10 bzw. 20 l/(m²h) reduziert. Um trotzdem vergleichbare Energiemenge einbringen zu können, wird die Vorlauftemperatur auf 55 °C erhöht. Es zeigt sich, dass bei dem Volumenstrom von 10 l/(m²h) die Leistungen innerhalb der ersten Stunde, auf unter 350 W/m² reduziert sind, während bei 20 l/h bzw. 45 l/h bis zu 450 W/m² erreicht werden können. Bei einer längeren Gesamt-Beladezeit von 9 Stunden wird eine mittlere Beladeleistung von ca. 250 W/m² bei allen untersuchten Vorlauftemperaturen und Volumenströmen erreicht.

Tabelle 15:
Randbedingung der einzelnen Vorversuche der Neubau-Decke.

| Versuch | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | Nachheizen |
|-------------------|-----------|----|----|----|----|----|----|----|------------|
| Beladedauer | [h] | 9 | 9 | 9 | 4 | 9 | 4 | 9 | 164 |
| Volumenstrom | [l/(m²h)] | 45 | 45 | 45 | 45 | 10 | 10 | 20 | 5 |
| Vorlauftemperatur | [°C] | 44 | 44 | 44 | 44 | 54 | 54 | 54 | 30 |

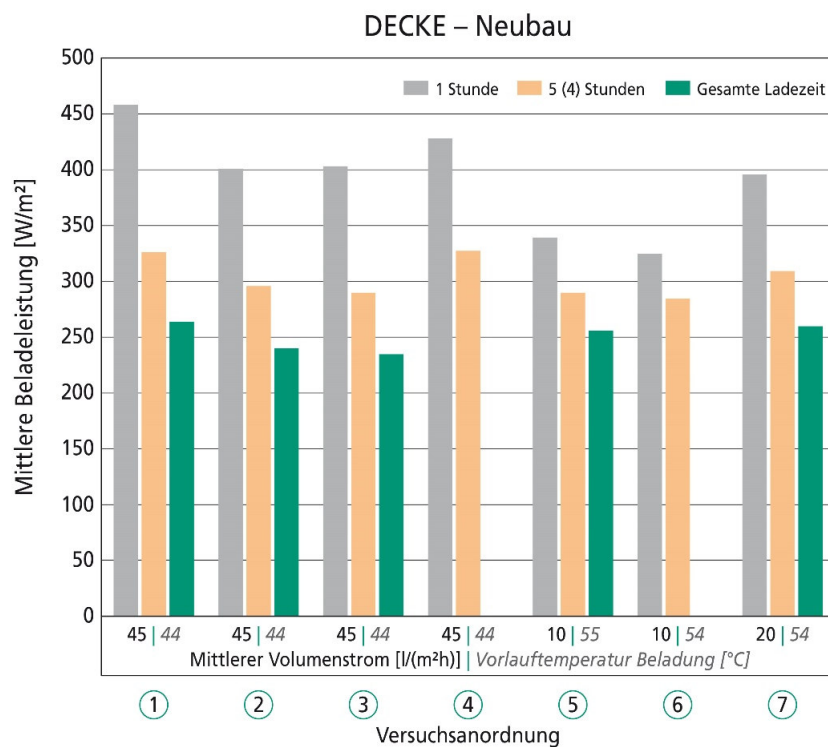
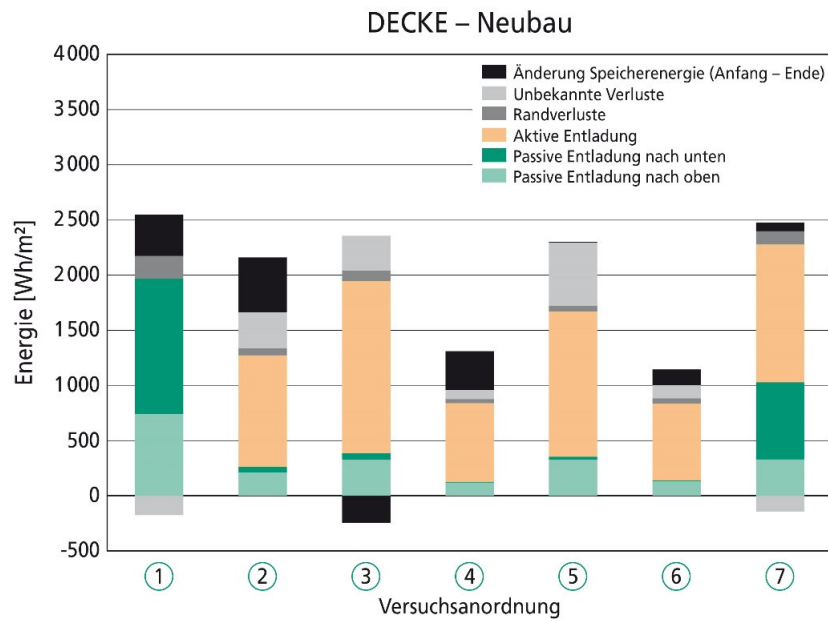


Bild 86:

Auswertung der Vorversuche an der Neubau-Decke.

Oben: Aufteilung der Speicherentladung auf die Teilbereiche aktive/passive Entladung und unbekannte Restverluste

Unten: Beladeleistung in Abhängigkeit vom Volumenstrom, der Vorlauftemperatur und der Beladedauer.

Links in der Thermographie in Bild 87 kann man erkennen, dass die thermische Entkoppelung der Deckeneinbindung am Rand zielführend ist. Es sind keine Erwärmungen/Wärmebrücken an der Wand unterhalb der Decke bei geladenem Speicher erkennbar.

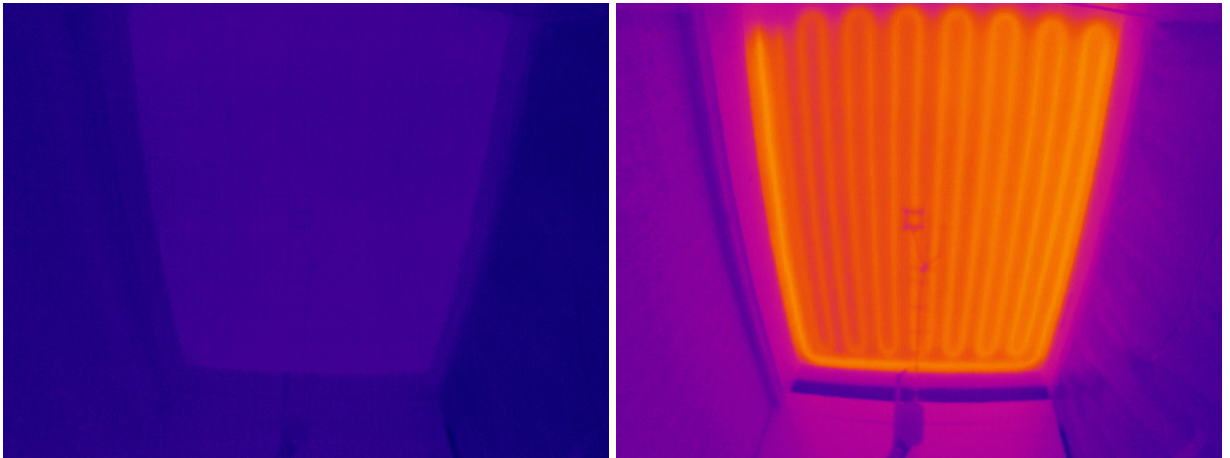


Bild 87:
Thermographie Aufnahme der Unterseite der Neubau-Decke.
Dargestellter Temperaturbereich: +10 °C bis +35 °C.
Links voll beladen nach 9 Stunden und rechts zum Vergleich nach Start der aktiven Entladung.

Neubau-Wand

Die detaillierten Randbedingungen der einzelnen Versuchsläufe der Neubau-Wand sind in Tabelle 16 zusammengestellt. Aus materialtechnischen Gründen ist es bei der Neubau-Wand nicht möglich, die Vorlauftemperatur auf 55 °C anzuheben. Oben in Bild 88 kann man erkennen, dass bei 9 Stunden Beladezeit in Versuch 1 nur ca. 1,2 kWh/m² geladen werden können (Zwischenraum KS-Stein/BTA-Rohr mit Quarzsand verfüllt). Auch das Vergießen des Zwischenraumes mit Quellvergussmörtel (Quickmix QV 1000) (ab Versuch 4) erhöht die Energiemengen nur geringfügig auf 1,5 kWh/m². Wird der Volumenstrom bei der vergossenen Neubau-Wand auf 10 bzw. 20 l/(m²h) gesenkt, sinkt auch die Energiemenge bzw. die Beladeleistung (Bild 88 unten) wieder ab. Die Ursache für diese geringe Wärmeübertragung ist mit hoher Wahrscheinlichkeit das Rohr-in-Rohr-Prinzip des aktuellen Wandtemperierungssystems von KS (Sammel- und Verteilrohr im Deckenbereich der KS-Wand). Dieses System ist zwar in der Installation sehr wirtschaftlich, da Vor- und Rücklauf einfach von oben in die fertige Wand gesteckt werden, allerdings strömt, wie links in Bild 89 dargestellt, der warme Vorlauf direkt am kalten Rücklauf vorbei. Hierdurch entsteht ein thermischer Kurzschluss, bei dem Wärme direkt in den Rücklauf übertragen wird, was die Leistungsübergabe an die KS-Wand reduziert. Rechts in Bild 89 ist eine ältere Version der KS-Wandtemperierung dargestellt, die nach dem Tichelmann-Prinzip verschaltet ist und somit keinen thermischen Kurzschluss aufweist (Verteil/Sammelrohr im Decken- und Fußbodenbereich der KS-Wand eingeschlitz). Der Einbau ist hier allerdings aufwendiger, da der untere Leiter in die KS-Wand eingefräst wird. Im weiteren Verlauf des Projekts soll dieses System in den Simulationsstudien berücksichtigt werden. Da die hydraulische Verschaltung hier deutlich einfacher ist, ist keine erneute Validierungsmessung notwendig.

Tabelle 16:
Randbedingung der einzelnen Vorversuche der Neubau-Wand mit dem untersuchten Rohr-in-Rohr-System.

| Versuch | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | Nachheizen |
|---------------------------|------------------------|-------------|----|-----|-----------|----|----|------------|
| Verbund Stein zu BTA-Rohr | | unvergossen | | | vergossen | | | |
| Beladedauer | [h] | 9 | 24 | 30 | 9 | 9 | 9 | 168 |
| Volumenstrom | [l/(m ² h)] | 55 | 55 | 155 | 55 | 10 | 20 | 6 |
| Vorlauftemperatur | [°C] | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 | 30 |

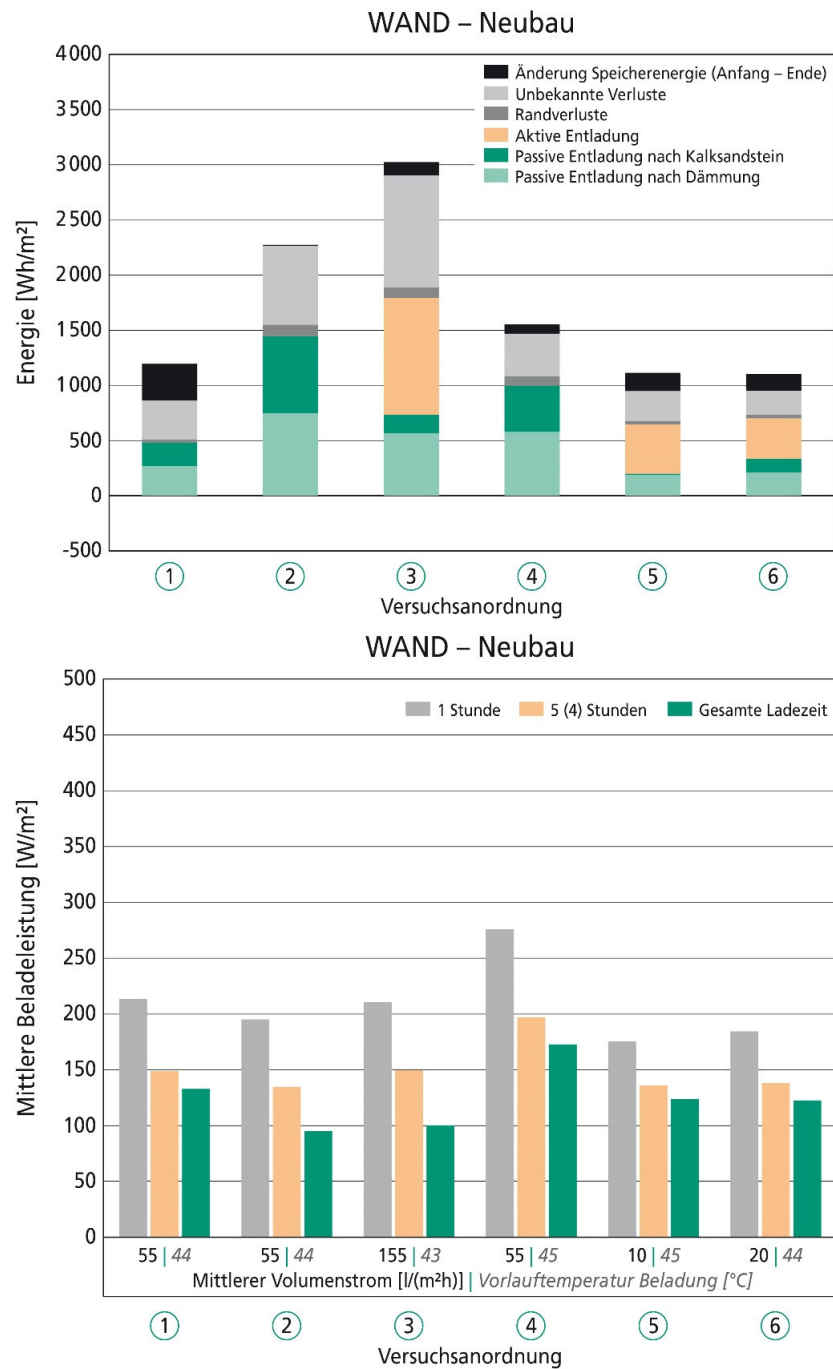


Bild 88:
 Auswertung der Vorversuche an der Neubau-Wand.
 Oben: Aufteilung der Speicherentladung auf die Teilbereiche aktive/passive Entladung und unbekannte Restverluste.
 Unten: Beladeleistung in Abhängigkeit vom Volumenstrom, der Vorlauftemperatur und der Beladedauer.

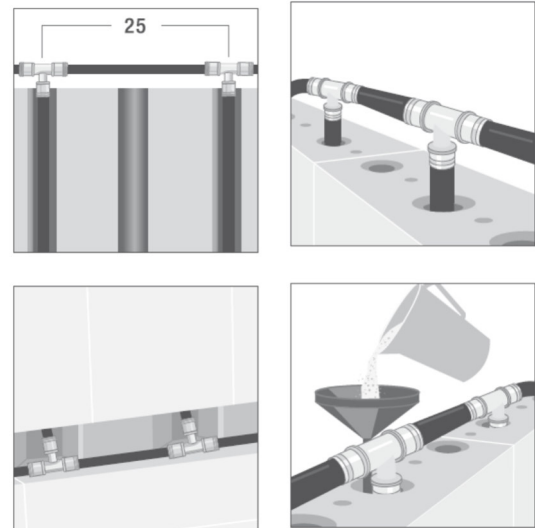
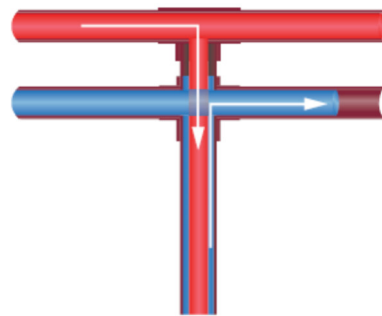


Bild 89:

Links: Rohr-in-Rohr-Konzept der aktuellen KS-Wandtemperierung.

Rechts: Alternative KS-Wandtemperierung in Tichelmann-Verschaltung mit eingeschliztem Sammel-/Verteilrohr im Bereich der Betondecke und im Sockelbereich der KS-Wand.

In der Thermographie in Bild 90 kann man am Fehlen von Wärmebrücken ober- oder unterhalb der Speicherwand erkennen, dass auch bei der Neubau-Wand die thermische Entkoppelung der Einbindung am unteren Ende der Wand zielführend ist. Im Vorversuch ist die Wand oben nicht an eine Decke angebunden, sondern die freistehende Verrohrung ist gedämmt. In der Thermographie sind deutlich die horizontal verlaufenden hölzernen Befestigungslatten des Wandheizungssystems zu erkennen. Diese stellen eine ungewollte interne Wärmebrücke dar.

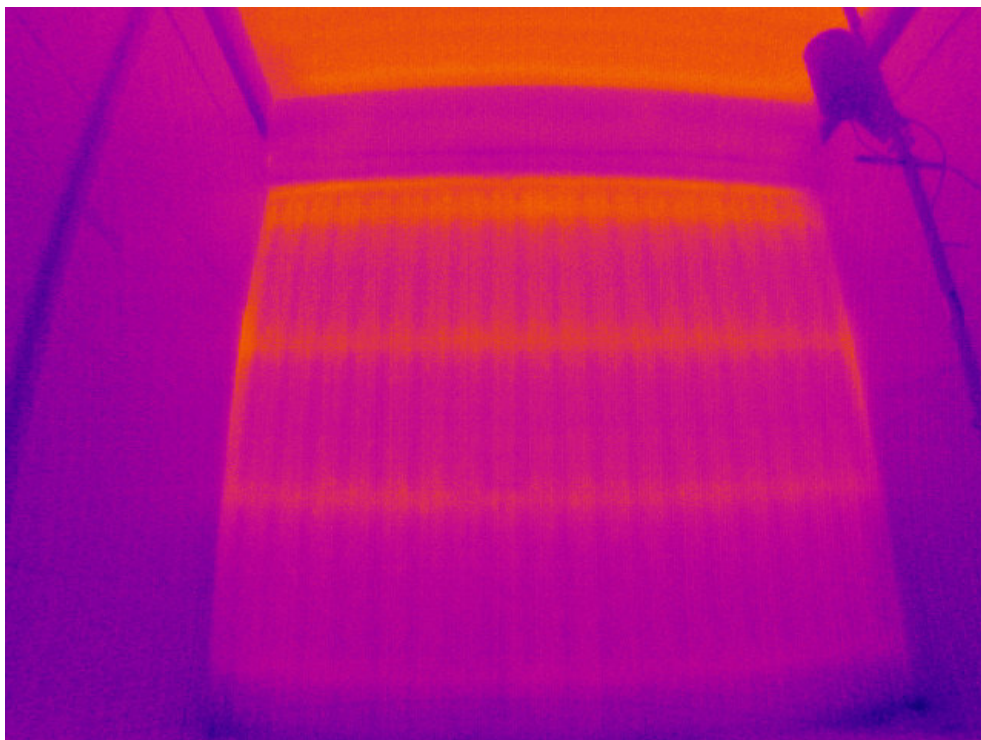


Bild 90:
Thermographie Aufnahme der Neubau-Wand nach 9 Stunden Beladung.
Die darüber befindliche Neubau-Decke wird gerade aktiv Entladen.
Dargestellter Temperaturbereich: +10 °C bis +35 °C.

Sanierungs-Decke

Die detaillierten Randbedingungen der einzelnen Versuchsläufe der Sanierungs-Decke sind in Tabelle 17 zusammengestellt. Da die beiden Sanierungs-Prüflinge in einer realen Einbausituation vermessen werden, ist es nicht möglich, Wärme-flussscheiben an den umlaufenden Flächen der jeweiligen Bauteile anzubringen (Einbindung Deckenbereich). Aus diesem Grund können die Randverluste nicht separat messtechnisch ermittelt werden. Die Randverluste sind deshalb in den Auswertungen der Sanierungs-BTAs in den „unbekannten Verlusten“ enthalten. Oben in Bild 91 kann man erkennen, dass auch in die Sanierungs-Decke, mit dem an der Oberfläche angebrachten BTA-Ladesystem, in 9 Stunden bis zu 2,0 kWh/m² in die Decke eingespeichert werden können. Es fällt auf, dass die kontrollierte aktive Entladung einen geringeren Stellenwert hat als bei der Neubau-Decke. Dies ist darin begründet, dass bei der bestehenden Zwillingshausdecke keine thermische Trennung an der Einbindung der BTA-Decke in die umlaufenden Wände möglich ist und damit eine erhöhte passive Entladung in diesem Bereich erfolgt. Unten in Bild 91 ist zu erkennen, dass die 9 Stunden-Beladeleistung mit ca. 200 W/m² etwas geringer als bei der Neubau-Decke (250 W/m²) ist.

Tabelle 17:
Randbedingung der einzelnen Vorversuche der Sanierungs-Decke.

| Versuch | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | Nachheizen |
|------------------|-----------|----|----|----|-----|----|------------|
| Beladedauer | [h] | 9 | 9 | 4 | 5+4 | 9 | 168 |
| Volumenstrom | [l/(m²h)] | 10 | 10 | 10 | 10 | 12 | 5 |
| Vorlaufemperatur | [°C] | 55 | 55 | 55 | 55 | 55 | 30 |

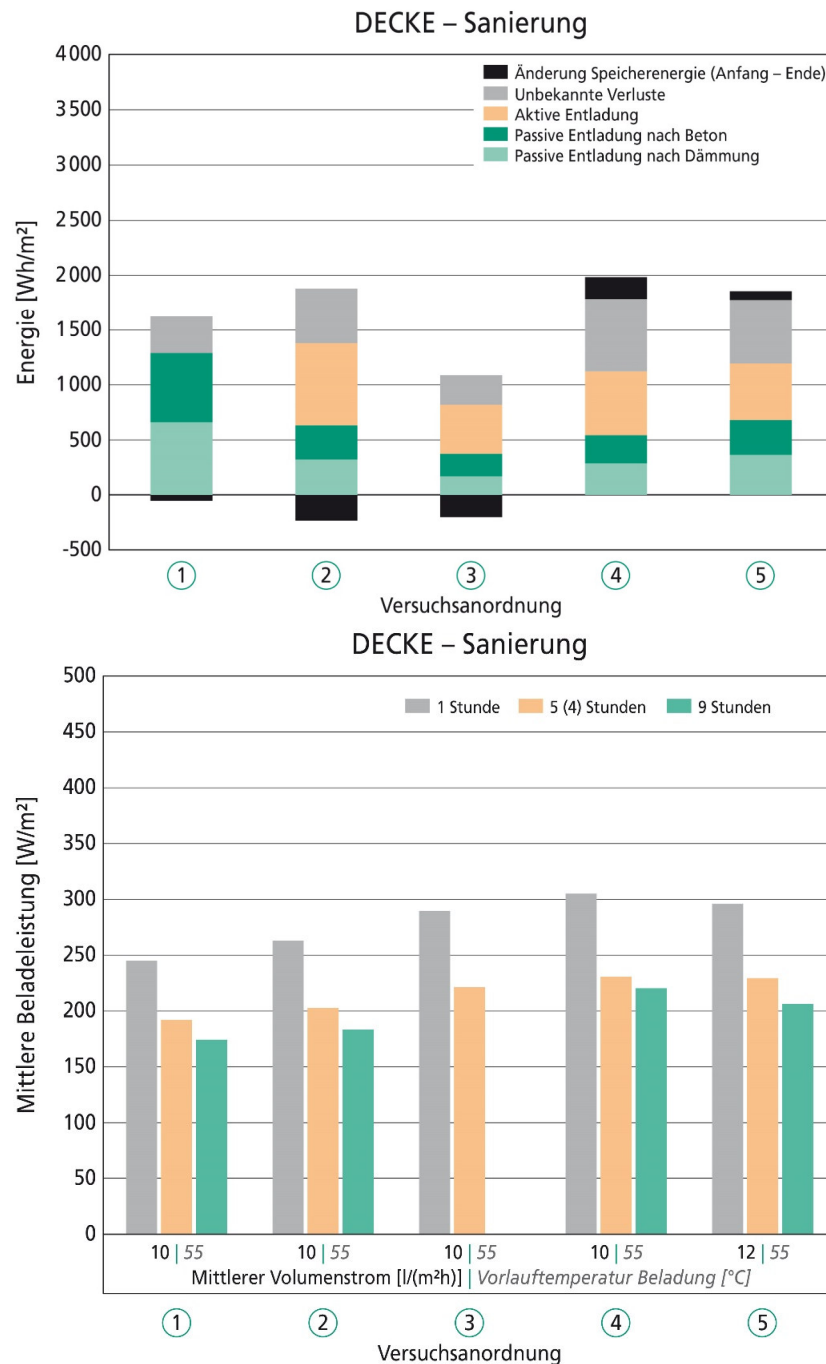


Bild 91:
Auswertung der Vorversuche der Sanierungs-Decke.

Oben: Aufteilung der Speicherentladung auf die Teilbereiche aktive/passive Entladung und unbekannte Restverluste.

Unten: Beladeleistung in Abhängigkeit vom Volumenstrom, der Vorlauftemperatur und der Beladedauer.

In der Thermographie in Bild 92 kann anhand des umlaufenden hellen Streifens am Übergang der Decke zur Wand und zur Betonstütze (rechts unten im Bild) die fehlende thermische Entkoppelung erkannt werden. Die beiden grün markierten dunklen, rechteckigen Flecken repräsentieren zwei verrutschte Dämmplatten über den Profilen der aktiven Entladung. Entsprechend gibt es helle, warme Stellen an den Profilen, an denen diese Dämmplatten fehlen.



Bild 92:

Thermographie Aufnahme der Unterseite der Sanierungs-Decke, voll beladen nach 9 Stunden.

Dargestellter Temperaturbereich: +10 °C bis +35 °C.

Sanierungs-Wand

Die detaillierten Randbedingungen der einzelnen Versuchsläufe der Sanierungs-Wand sind in Tabelle 18 zusammengefasst. In Bild 93 kann man erkennen, dass in die Sanierungs-Wand, obwohl sie mit demselben System wie die Sanierungs-Decke beladen wird, ca. 10 Prozent weniger Wärme eingespeichert werden kann. Auch die Beladeleistungen sind entsprechend geringfügig reduziert. Dies ist darin begründet, dass der bewehrte Stahlbeton der Decke mit $\lambda = 2,30 \text{ W/(mK)}$ eine entsprechend höhere Wärmeleitfähigkeit hat als der verwendete KS-Stein ($\rho = 2 \text{ kg/dm}^3$) mit $\lambda = 1,10 \text{ W/(mK)}$, wodurch die Wärme schlechter in das Wand-Bauteil eingeleitet werden kann

Tabelle 18:
Randbedingung der einzelnen Vorversuche der Sanierungs-Wand.

| Versuch | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | Nachheizen |
|-------------------|------------------------|----|----|----|----|-----|----|------------|
| Beladedauer | [h] | 9 | 9 | 9 | 4 | 5+4 | 9 | 141 |
| Volumenstrom | [l/(m ² h)] | 35 | 10 | 10 | 10 | 10 | 23 | 6 |
| Vorlauftemperatur | [°C] | 55 | 54 | 54 | 55 | 55 | 55 | 30 |

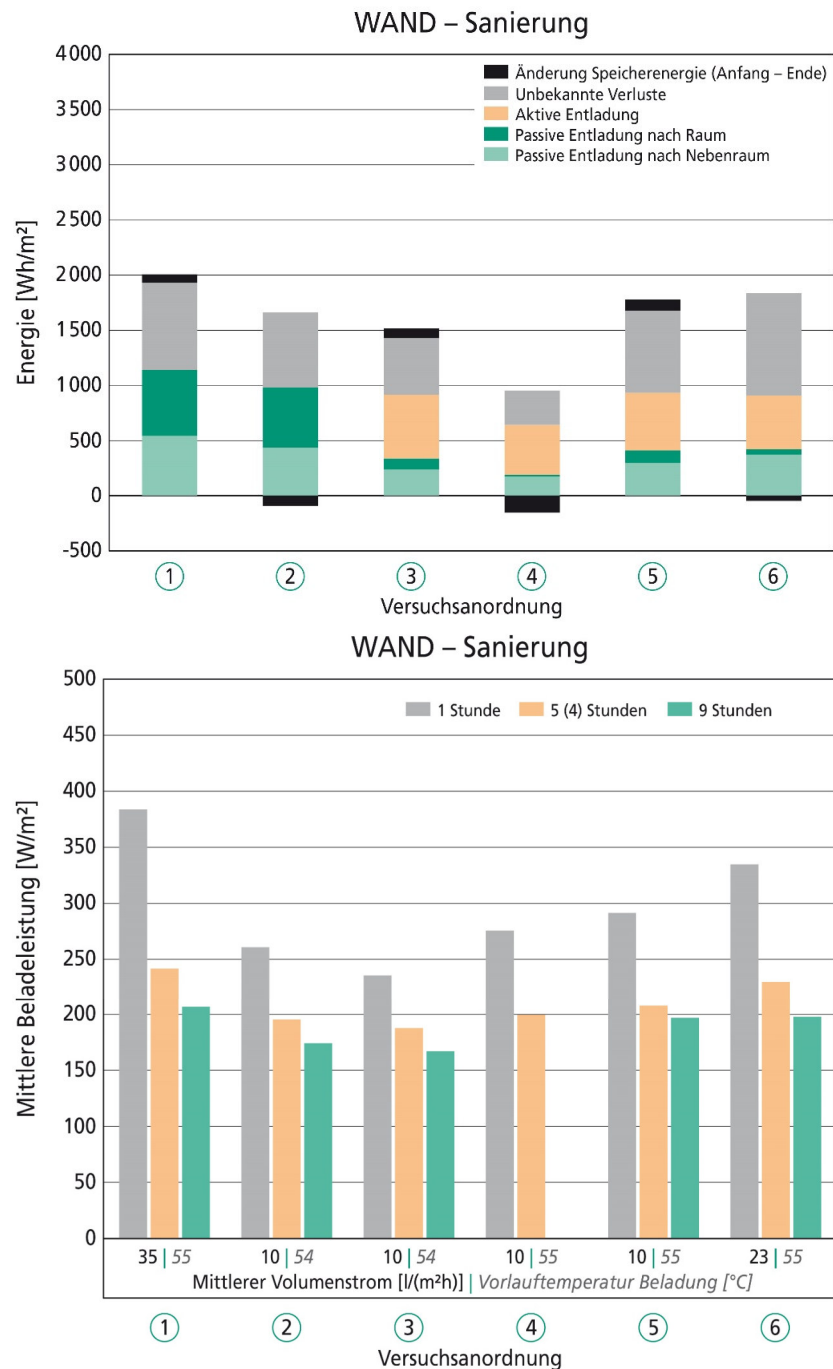


Bild 93:
Auswertung der Vorversuche der Neubau-Wand.

Oben: Aufteilung der Speicherentladung auf die Teilbereiche aktive/passive Entladung und unbekannte Restverluste.

Unten: Beladeleistung in Abhängigkeit vom Volumenstrom, der Vorlauftemperatur und der Beladedauer.

Die Thermographie in Bild 94 zeigt ein vergleichbares Bild wie die Thermographie der Neubau-Wand mit der Temperaturansammlung im oberen Bereich. Man kann zudem die Alu-Lamellen (Wärmeleitbleche) der BTA-Beladung als helle, wärmere, vertikale Streifen erkennen. Bei dem gewählten Aufbau der Sanierungs-Wand berühren diese Lamellen die Dämmebene zwischen BTA und aktiver Entladung, wodurch sie auf der Außenseite erkennbar werden. Bei der Sanierungs-Decke ist dieser Effekt nicht erkennbar, da hier ein Luftspalt zwischen den Lamellen und der Dämmung existiert und die warmen Lamellen somit relativ gleichmäßig die deckenseitige Oberfläche der Dämmung erwärmen. Bei der Neubau-Wand erfolgt die Beladung der BTA über das Rohrsystem in der Mitte der relativ gut wärmeleitenden KS-Steine, wodurch sich die Wärme bis zum Erreichen der Dämmebene relativ gleichmäßig über die Wandfläche verteilt.

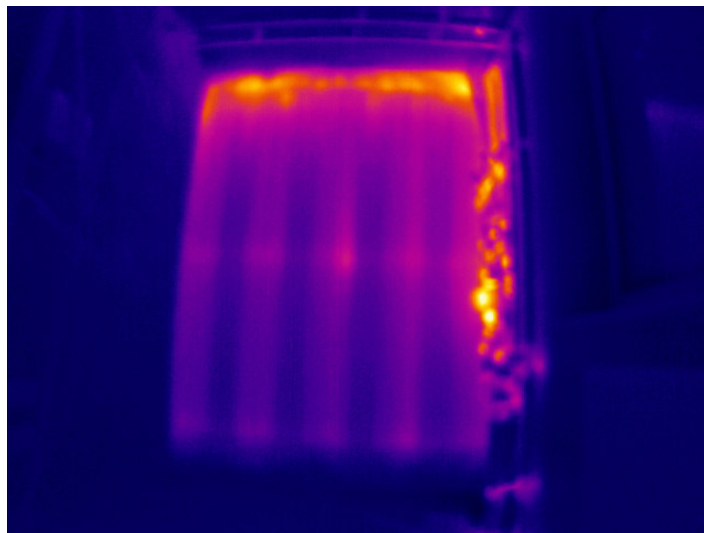


Bild 94:

Thermographie Aufnahme Sanierungs-Wand, voll beladen nach 9 Stunden.

Dargestellter Temperaturbereich: +10 °C bis +35 °C.

Die warmen Strukturen auf der rechten Seite der Wand sind die Armaturen der hydraulischen Anbindung.

2.5 Freiland-Versuche

Im Rahmen der Freiland-Versuche auf dem Gelände des Fraunhofer IBP bei Holzkirchen werden die Funktion des HTSS sowie der Neubau- und der Sanierungs-Deckenspeicher unter realistischen Randbedingungen validiert. Zudem wird hier die Windheizung 2.0-Regelung zusammen mit den jeweiligen realen Speichersystemen implementiert, erprobt und optimiert.

2.5.1 Versuchsaufbau

HTSS

Der Hochtemperatur-Steinspeicher wird im Keller eines der beiden Zwillingshäuser installiert. Bild 95 zeigt den HTSS während vier unterschiedlicher Stadien des Aufbaus, während Bild 96 den kompletten Speicher inkl. des fertigen Heißluft-Kreises vor dem Dämmen der Verrohrung zeigt.

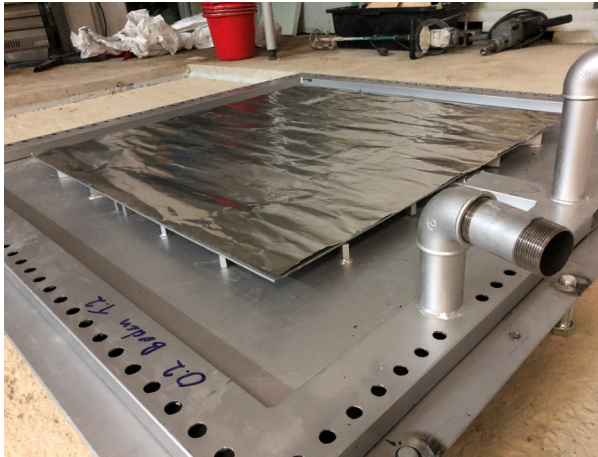


Bild 95:
HTSS während des Aufbaus.

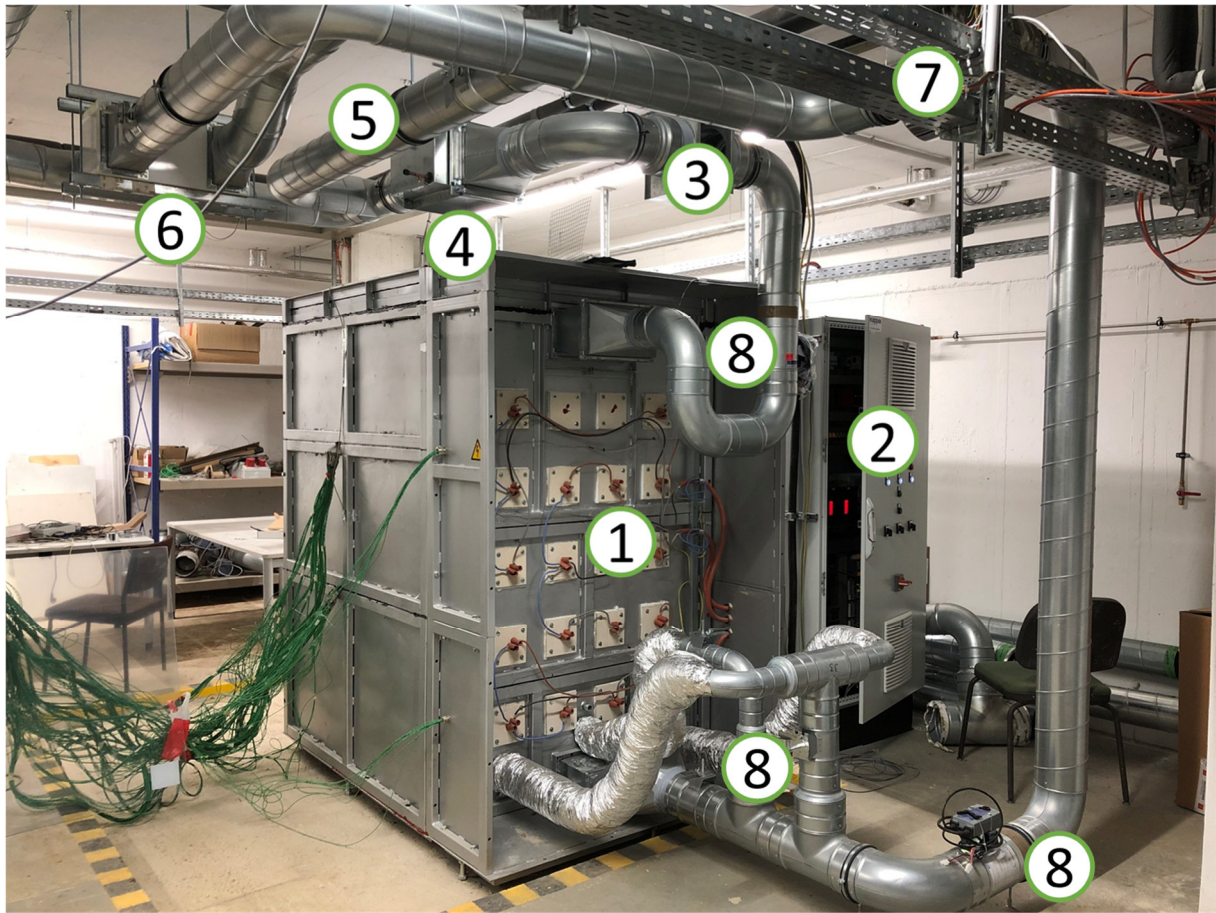


Bild 96:

Fertiger HTSS inkl. Heißluftsystem (noch ungedämmt).

1) kontaktierte Heizwendeln, 2) Schaltschrank [KT], 3) Metallfilter, 4) TWW-Wärmetauscher, 5) HTSS-Sommerbypass, 6) Luft-Luft-Wärmetauscher zur Raumheizung, 7) Heißluft-Ventilator, 8) Brandschutzklappen (95 °C, 2x) und Klappen zur Steuerung der Luftführung.

Vor Installation der in Bild 96 abgebildeten Verrohrung des Heißluftkreises wurde der Speicher mit einer temporären Fortluftführung langsam, über den Verlauf von 2 Tagen, bis auf 500 °C erwärmt, um die Feuchte aus den Steinen und dem Mörtel schadensfrei auszutreiben. In Bild 97 sind die Temperaturverläufe der einzelnen Messstellen im Speicherkern während dieses Trockenheizens und der anschließenden Abkühlphase dargestellt. Das schnelle Abkühlen ist der Tatsache geschuldet, dass der Speicherkern während dieses Prozesses mit trockener und kalter Außenluft gespült wurde. Im Vertikalschnitt in Bild 98 ist zu erkennen, dass der HTSS am Ende der Aufheiz-Periode eine relativ homogene Temperaturverteilung aufweist, nur mit einem geringfügig kühleren Abschnitt im Bodenbereich, dort wo die Kaltluft einströmt.

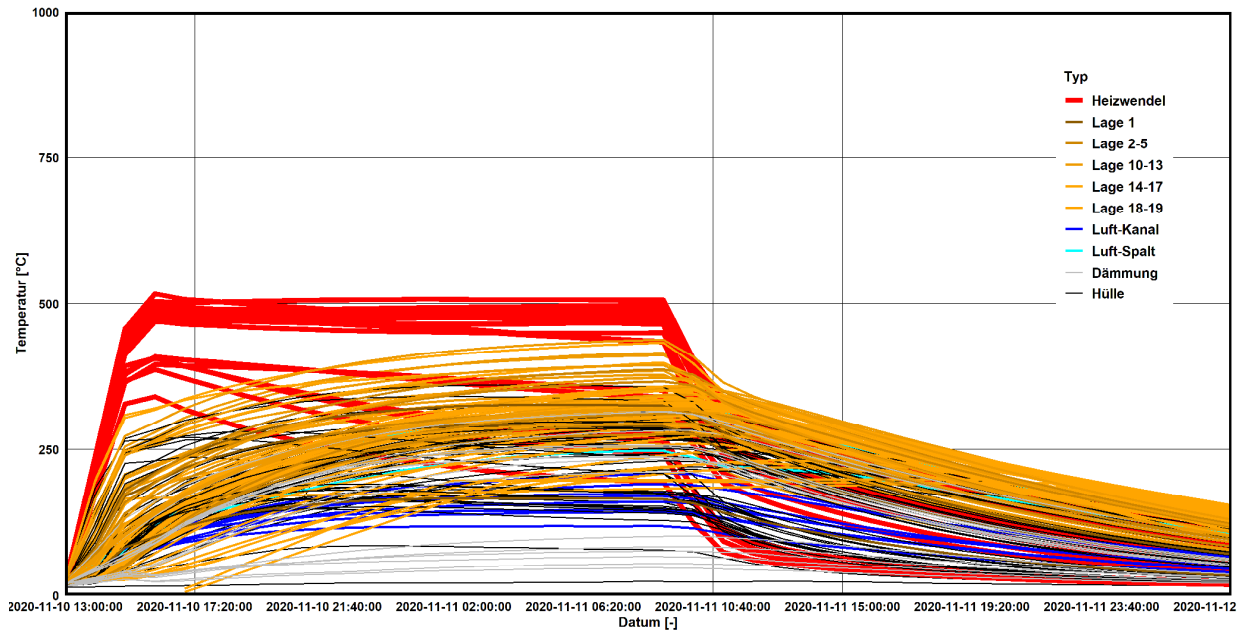


Bild 97:
Temperaturverlauf im HTSS während des Trockenheizens und des anschließenden Auskühlens.

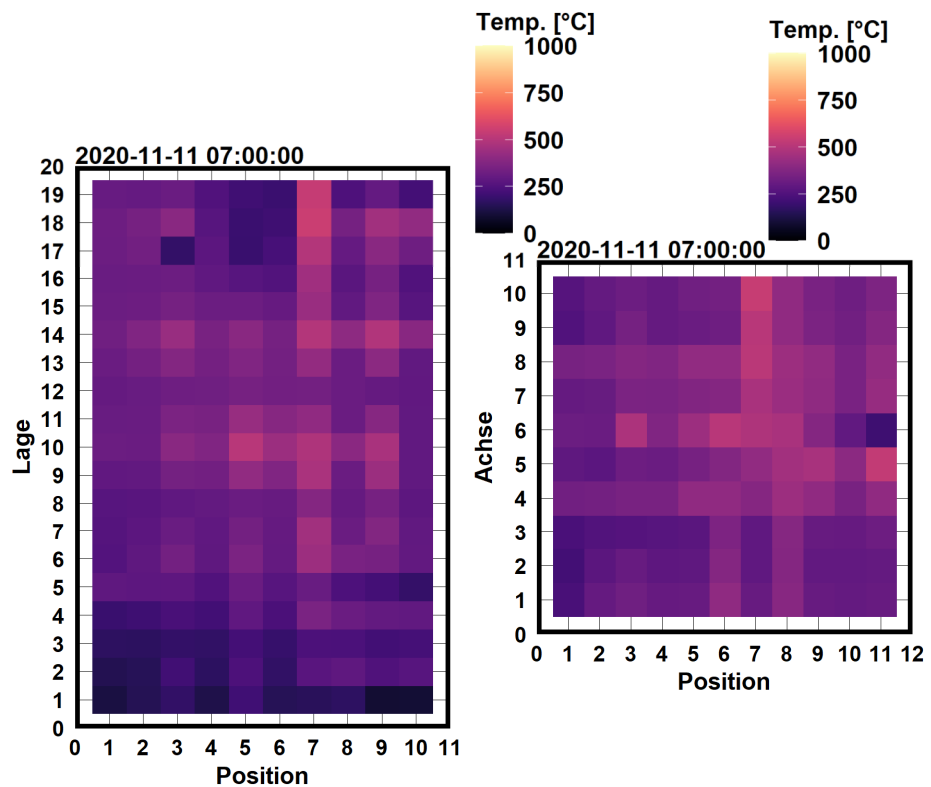


Bild 98:
Vertikalschnitt (links) und Horizontalschnitt (rechts) am Ende der Aufheizperiode.

In Bild 99 links befindet sich das Thermogramm der Vor- und Rückseite des HTSS am Ende der Heizphase des Trockenheizens. Generell werden die Bauteile der Außenoberflächen wie geplant nur handwarm (mit Ausnahme der elektrischen Kontaktierungsstellen der Heizwendeln). Auch die temporäre Heißluftausschleusung für das Trockenheizen ist nicht gedämmt und wird dadurch entsprechend heiß. Ungeplant ist die starke Erwärmung im Bereich der oberen Vorderkante, die sich ca. 20 cm weit in die seitlichen Oberkanten hineinzieht. Im Rahmen einer Nachbesserung durch den Projektpartner Rath GmbH bestätigte sich die Vermutung, dass es in diesem Bereich zu einer Vermischung von Spül- und Kernluft kommt. Es wird vermutet, dass durch die starke Verbauung durch die 20 Heizwendeldurchführungen im Spülpalt die Luftströmung so stark beeinträchtigt wird, dass die Wärmeabfuhr der Spülluft entsprechend reduziert ist. Es wird keine Möglichkeit gesehen, diese Abweichung im Rahmen des aktuellen Projekt- und Zeitplans nachzubessern, da wesentliche Teile der Speicherhülle neu konstruiert und gebaut werden müssten. Die hierdurch entstehenden, etwas höheren Speicherverluste sind nur schwer quantifizierbar. Da der Speicherkern über eine etwas höhere Kapazität verfügt als theoretisch für die Beheizung und TWW-Bereitung des Versuchsgebäudes notwendig ist, bewerten die Projektpartner dies für diesen Versuch als unkritisch. Lediglich die Effizienz des Speichers wird reduziert, was im Prototypen-Stadium im Allgemeinen als noch akzeptabel angesehen wird.

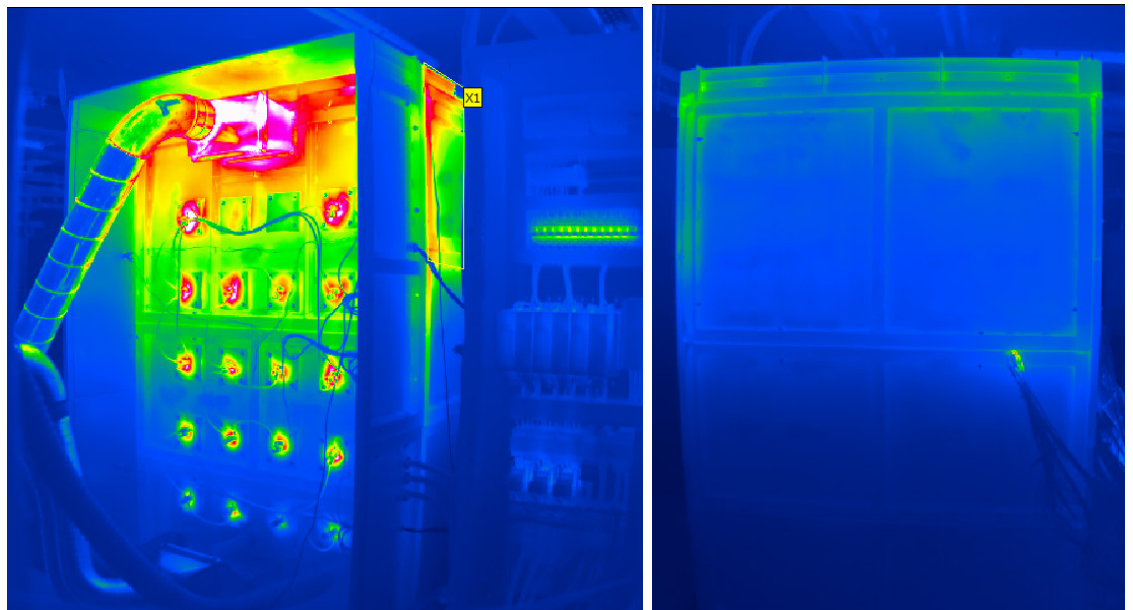


Bild 99:
Thermogramm der Vorderseite (links) und der Rückseite (rechts) des HTSS am Ende der Heizphase des Trockenheizens.

Zur Reduktion der unerwartet hohen Wärmeverluste im oberen Bereich des HTSS wurde in diesem Bereich nachträglich die in Bild 100 dargestellte zusätzliche, 5 cm starke Dämmlage aus aluminium-kaschierter Mineralwolle angebracht. Eine größere Dämmschichtdicke konnte nicht gewählt werden, da ansonsten bei Stillstand des Systems mit fehlender Luftströmung im Spülluftspalt die Temperaturfestigkeiten der inneren Dämmschichten gefährdet werden könnten. Die das elektrische Anschlussfeld beinhaltende, hinterlüftete Vorderseite des HTSS wurde bei dieser Dämmmaßnahme ausgespart, da die Hinterlüftung eine zusätzliche Dämmung sinnlos machen würde.



Bild 100:
Zusätzliche, nachträgliche Wärmedämmung im oberen Bereich des HTSS. Links: Frontansicht, rechts Rückansicht.

Sanierungs-BTA

In dem zweiten Zwillingshaus, dem BTA-Haus, wurden zusätzlich zur bereits ausgestatteten Wohnzimmerdecke die Decken der restlichen Erdgeschossräume als Sanierungs-Decken-BTA-Speicher ausgebildet. Hierbei kam das in Abschnitt 2.2.1 beschriebene überarbeitete Design zum Einsatz. Im Wohnzimmer wurde der bestehende Deckenspeicher aus den Vorversuchen beibehalten, da die Überarbeitung vor allem Optik und Verarbeitbarkeit betrifft, kaum aber die thermisch-energetische Funktionalität. In Bild 101 sind diese Aufbauarbeiten in unterschiedlichen Stadien und Räumen des BTA-Hauses dargestellt, während in Bild 102 die hydraulische Geschoss-Verteilung im Flur und die hydraulische Versorgung im Keller inkl. Durchlauferhitzer dargestellt ist.



Bild 101:
Aufbau des BTA-Speichers für Sanierungs-Decken im BTA-Zwillingshaus.



Bild 102:
 Hydraulische Versorgung des BTA-Speichers.
 Links die Geschossverteilung für BTA und aktive Entladung im Erdgeschoss-Korridor.
 Rechts die Versorgung im Keller mit dem 50 kW Durchlauferhitzer auf der linken Seite der Regelungsmimik und rechts die Rücklaufwärmepumpe zur TWW-Bereitung.

Über den Jahreswechsel 2020/21 wurde ein einfacher Abklingversuch durchgeführt, bei dem der BTA-Speicher beladen und anschließen passiv entladen wurde. Die hierbei aufgezeichneten Temperaturverläufe des Speicherkerns sind in Bild 103 dargestellt. Unter der Annahme einer minimalen Komforttemperatur von 20 °C gilt der Speicher bei 20 °C entsprechend als vollständig entladen. Die Zeitkonstante des Speichersystems ist durch die Dauer bestimmt nach welcher der Speicher 2/3 seiner Wärme verloren hat, also beginnend bei 43 °C, bei 27,7 °C; nach 46 h.

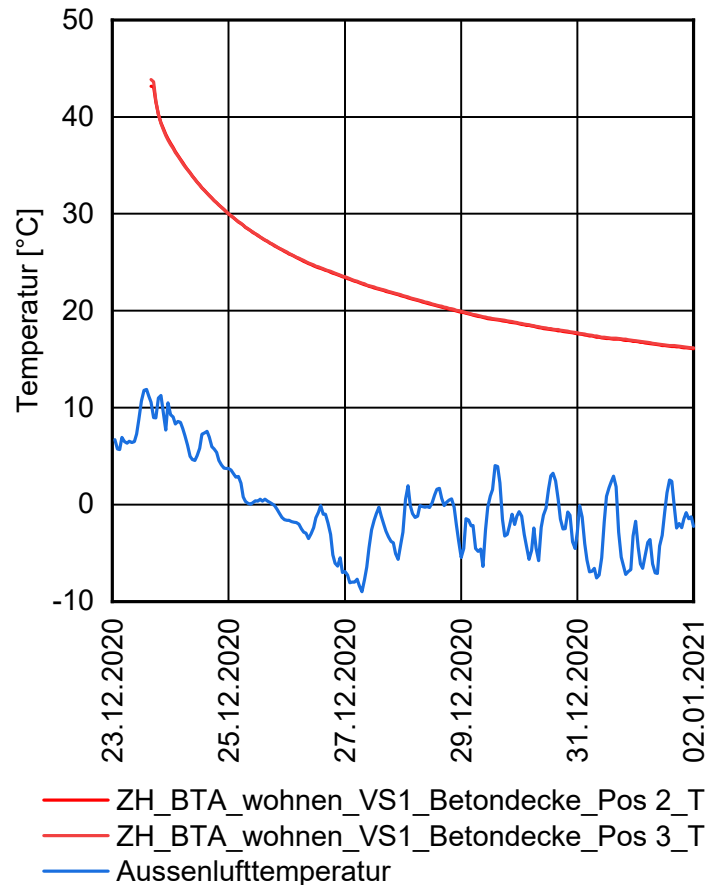


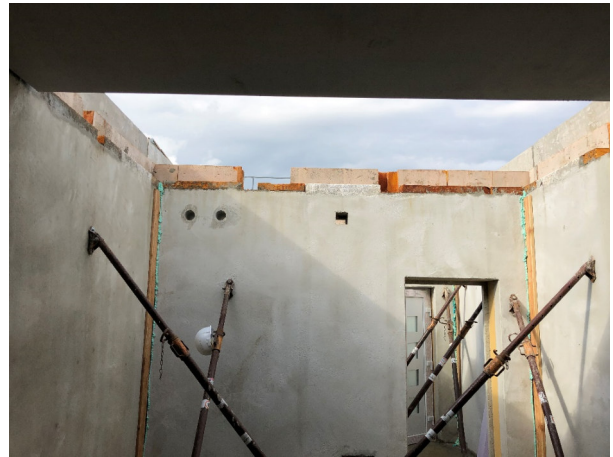
Bild 103:
 Verlauf der BTA-Speichertemperaturen des Wohnzimmers und der Außenlufttemperaturen während des ersten Abklingversuchs der Sanierungsdecke im BTA-Haus.

Neubau – BTA

Zur Untersuchung der BTA-Speicher für Neubaudecken wurde auf dem Freiland-Versuchsgelände des Fraunhofer IBP ein neuer Versuchsstand aus Beton-Sandwichelementen (U_{Wand} -Wert: $0,13 \text{ W/(m}^2\text{K)}$), der „CUBE“ errichtet (Bild 104). Damit der CUBE trotz entsprechender Wärmedämmung als einzelner, freistehender Raum keine unrealistisch hohen Wärmeverluste aufweist, wird einerseits der Technikraum, der an die Nordwand des Messraums anschließt, adiabatisch beheizt. Das bedeutet, dass der Technikraum mit einem variablen Sollwert auf dieselbe Lufttemperatur geheizt wird, die im Versuchsraum gemessen wird. Folglich gibt es zwischen beiden Seiten der Innenwand keine Temperaturdifferenz und somit auch keinen Wärmestrom. Für die Decke bzw. die Dachfläche wird andererseits ein vergleichbares Konzept angewendet, um eine Position des Raumes in einem mittleren Geschoss eines Gebäudes zu repräsentieren. Hierzu wird innerhalb der Dachdämmung, wie in Bild 105 während des Aufbaus dargestellt, eine stufenlos dimmbare, elektrische Heizfolie eingelegt. Die Grenzschichttemperatur dieser Adiabatschicht wird so geregelt, dass sie der Grenzschichttemperatur an der Oberseite des BTA-Deckenspeichers entspricht.



Während des Aufbaus;
Bodenplatte und Technikraum aufgestellt



Deckenteile und Innenwände aufgestellt und
abgestützt



Setzen der Westwand des Messraums



Dachabdichtung vor dem Aufbringen von Kies



Außenansicht des fertigen CUBES



Innenansicht des fertigen CUBES

Bild 104:
Ansichten des neuen CUBE-Versuchsstands.



Bild 105
 Adiabatsystem der Testraumdecke des CUBEs während des Aufbaus. Auf der rechten Seite des Daches sind vier der Heizfolien bereits ausgelegt.

Regelung

Die tekmar-Regelungskomponenten wurden in die SPS (Speicherprogrammierbare Steuerung) der drei Windheizung 2.0-Versuchsstände (Bild 106) eingebaut und elektrisch angeschlossen.



Bild 106:
 In die Versuchseinrichtung (hier im CUBE) installierte tekmar-Komponenten für die Regelung des Windheizung 2.0-Konzepts.

2.5.2 Künstliche Nutzer

Im gewählten Versuchsszenario werden keine realen Personen, sondern künstliche Nutzer eingesetzt, die von der MSR-Technik der Versuchsstände kontrolliert und vermessen werden. Der Vorteil dieser Herangehensweise ist zum einen die Möglichkeit die Einwirkungen auf das Gebäudeverhalten genau festzulegen und messtechnisch zu dokumentieren, so dass sie genau bekannt sind. Zum anderen können solche künstliche Nutzer sehr regelmäßig gestaltet werden, so dass die Auswirkungen unterschiedlicher Regelungseinstellungen und Außenklimabedingungen nicht zusätzlich durch eine unregelmäßige Nutzung überlagert werden, was die Analyse der Messdaten erleichtert.

Lüftung

Im Neubau werden energieeffiziente Wohngebäude in Deutschland in der Regel mit raumlufttechnischen Anlagen ausgestattet. Die Referenztechnologie des GEG 2020 sieht eine bedarfsgeführte Abluftanlage ohne Wärmerückgewinnung vor. Ein entsprechender konstanter Luftwechsel wird für alle Räume angesetzt. Der Mindest-Außenluftwechsel nach DIN V 18599-10 [10] beträgt $0,45 \text{ h}^{-1}$ für bedarfsgeführte Lüftungsanlagen. Zusätzlich wird nach DIN V 18599-2 ein monatsabhängiger Fensterluftwechsel angesetzt. Somit ergibt sich ein konstanter, monatsweise unterschiedlicher Gesamt-Außenluftwechsel nach Bild 107. Die aus dem GEG resultierende 15 Prozentige Unterschreitung der Anforderungen an den Primärenergiebedarf der Neubaufälle legt für diese Neubaufälle den Einsatz einer Wohnungslüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung nahe. Entsprechend den verbesserten Standardwerten nach EnEV wird ein Wärmerückgewinnungsgrad von 80 Prozentige bei einem konstanten Luftvolumenstrom von $0,35 \text{ h}^{-1}$ festgelegt. Der nach Bild 107 verbleibende restliche Volumenstrom wird als Infiltration bzw. Fensterluftwechsel über die Außenluft realisiert. Um die Vergleichbarkeit der Messergebnisse aller Monate der Heizperiode zu gewährleisten, wird für die hier beschriebenen Versuche der Mittelwert der Heizperiode von $0,50 \text{ h}^{-1}$ für den Betrieb der Lüftung mit Wärmerückgewinnung angesetzt. Die Zwillingshäuser haben ein Nettoraumvolumen von 380 m^3 , wobei 220 m^3 auf das Erd- und 160 m^3 auf das Dachgeschoss entfallen. Der Cube verfügt über ein Nettoraumvolumen von 63 m^3 . Die für die Versuche gewählten Luftwechselraten sind in Tabelle 19 zusammengefasst.

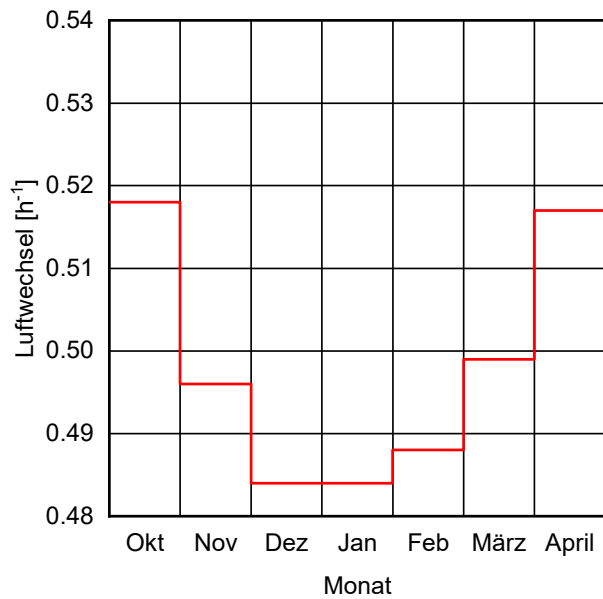


Bild 107:
Verlauf des Luftwechsels über die Heizperiode.

Tabelle 19:
Luftwechselraten in den Zwillingshäusern und dem Cube.

| Raum | Stockwerk | Anschlussart | Luftwechsel [m ³ /h] |
|---------------------------|-------------|--------------|---------------------------------|
| Zwillingshäuser N2 und O5 | | | |
| Wohnzimmer | EG | Zuluft | 35 |
| Esszimmer | | | 35 |
| Schlafzimmer | | | 35 |
| Bad | | Abluft | 55 |
| Küche | | | 55 |
| Summe | | | - |
| KAG* 1 | DG | Zu- & Abluft | 40 |
| KAG* 2 | | | 40 |
| Summe | | | - |
| Summe | 2 Geschosse | - | 190 (0,50 h ⁻¹) |
| Cube | | | |
| Testraum | | Zu- & Abluft | 32 (0,50 h ⁻¹) |

* KAG: Kind-Arbeit-Gast

Solltemperaturen

Das geplante Versuchsszenario sieht eine konstante Raumsolltemperatur vor, um das Verhalten der Windheizung 2.0-Regelung besser analysieren und optimieren zu können. Die Raumsolltemperaturen werden über die tekmar Wohnungsbox vorgegeben. Auch der Temperaturregelkreis befindet sich innerhalb der Wohnungsbox. Die speicherspezifische Regelungstechnik, im Versuch die SPS des Fraunhofer IBP, setzt lediglich die vorgegebenen Leistungswerte in Ventilpositionen bzw. elektrische Leistungsstellungen um.

Interne Wärmequellen

Zur Nachbildung der Wärmeabgabe von Personen, Geräten und Beleuchtung werden elektrisch interne Wärmequellen in entsprechende Höhe in die Räume der Versuchsgebäude eingebracht. Damit die Effekte und Einflüsse der Windheizung 2.0-spezifischen Regelung und Anlagentechnik möglichst klar erkennbar sind, wird auf eine zeitliche Profilbildung (Tages- / Wochengang) verzichtet und die Wärmequellen mit konstanter Leistung eingebracht. Nach DIN V 18599 sind für Einfamilienhaus-Wohngebäude interne Wärmequellen von 45 Wh/(m²d), entsprechend 1,875 W/m² als konstante Dauerlast. Die aus den jeweiligen Raumgrößen resultierende Höhe der internen Wärmequellen ist in Tabelle 20 zusammengefasst.

Tabelle 20:
Intern Wärmequellen der Zwillingshäuser und des Cubes.

| Raum Zwillingshaus | Geschoss | Nettogrundfläche [m ²] | Leistung IWQ [W] |
|--------------------|---------------|------------------------------------|------------------|
| Wohnzimmer | EG | 33,7 | 63,1 |
| Esszimmer | | 11,2 | 21,0 |
| Küche | | 11,2 | 21,0 |
| Schlafzimmer | | 7,4 | 14,0 |
| Bad | | 6,9 | 13,0 |
| Windfang | | 5,8 | 11,0 |
| Korridor | | 5,5 | 10,2 |
| Summe | | EG | 51,7 |
| KAG* 1 | DG | 34,6 | 64,9 |
| KAG* 2 | | 36,5 | 68,4 |
| Treppenhaus | | 12,9 | 24,2 |
| Summe | DG | 84,0 | 157,5 |
| Summe | Zwillingshaus | 135,69 | 254,4 |
| | | | |
| Testraum | Cube | 19,8 | 37,1 |

TWW-Zapfung

Nach DIN V 18599 ergibt sich für die Zwillingshäuser ein TWW-Bedarf von $8,5 \text{ Wh}/(\text{m}^2\text{d})$ bzw. ein entsprechend summierter Tagesbedarf von $3,86 \text{ kWh/d}$. Da das Verhalten des TWW-Pufferspeichers ein wesentlicher Bestandteil eines Windheizung 2.0-TGA-Systems ist, erscheint eine konstante TWW-Zapfung mit minimalem Durchfluss als ein wenig sinnvolles Versuchsdesign. Aus diesem Grund wird ein regelmäßiges tägliches Zapfprofil in Anlehnung an das Profil L nach DIN EN 13203-2 [11] verwendet. Da dieses „L“-Profil mit $2,1 \text{ kWh/d}$ einen etwas zu hohen Bedarf aufweist, wird die Energieanforderung der einzelnen Zapfungen um den Faktor 1,84 erhöht, um das Profil an die Vorgabe der DIN V 18599-10 anzugleichen. Der tägliche, kumulierte Energiebedarf dieser beiden Zapfprofile ist in Bild 108 dargestellt.

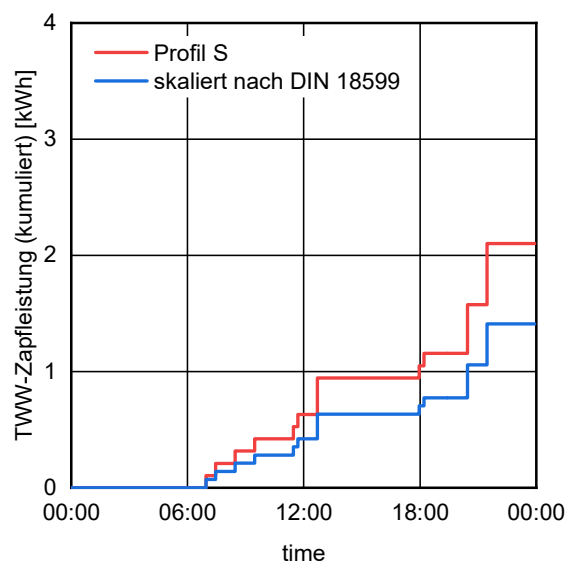


Bild 108:
Leistung des täglichen TWW-Zapfprofils.

Der Cube als Einzelraum ist nicht mit einer TWW-Zapfung ausgestattet, da als Speicher lediglich die, verhältnismäßig kleine, Decke des einzelnen Testraums als Speicher zur Verfügung stehen würde.

Sonstiges

CO₂- und interne Feuchtequellen sowie die manuelle Bedienung von Fenstern und Innentüre wurden im gewählten Versuchsszenario nicht betrachtet.

2.5.3 Rückbau des HTSS

Am Ende der Freilandversuche ab Mai 2022 wurde der HTSS zurückgebaut. Hierbei werden die einzelnen Komponenten begutachtet und analysiert, um bisher unbekannte Schwachstellen zu finden. Ein zentrales Augenmerk lag beim Rückbau der Speicherhülle bzw. des Speicherkerns auf dem vermuteten thermischen Kurzschluss zwischen Spül- und Kernluft.

Heizwendeln

Zunächst werden die drei Heizwendeln Nr. 1, 4 und 7 (siehe Bild 109) aus dem Speicher entfernt und mit einer Rückstellprobe in 132 verglichen. An den drei genutzten Wendeln kann man, wie erwartet eine leichte Verzunderung der Heizdrahtoberfläche feststellen. Diese bewegt sich jedoch im erwarteten Rahmen und ist technisch unproblematisch. Man kann jedoch ebenfalls erkennen, dass sich die Wicklungsabstände verändert und unregelmäßig verteilt haben. Z.B. rechts am kontaktierten Ende von Heizstab 7 / 3A beginnen sich einige Schleifen zu berühren. In kleinem Maß ist dies noch nicht kritisch, da die Spannung zwischen zwei Schleifen lediglich 0,5 V beträgt, im größeren Maßstab kann es aber zur Bildung von Glutnestern und folgenden Beschädigungen der Heizwendeln kommen. Aus diesem Grund werden die HTSS-Wendeln künftig voraussichtlich statt auf einen glatten Keramik-Trägerstab auf einen Stab mit Führungsrillen entsprechend den Heizdrahtschleifen aufgewickelt werden. Der Zustand aller 18 Heizwendeln nach dem Rückbau ist in Bild 111 zu sehen.



Bild 109:
HTSS mit 3 rückgebauten Heizwendeln Nr. 1, 4 und 7.



Bild 110:
Vergleich der 3 rückgebauten Heizwendeln Nr. 1 (1A), 4(2B) und 7(3A) mit einer ungenutzten Rückstellprobe (NEU).



Bild 111:
Abbildung aller 18 rückgebauten Heizwendeln.

Speicherhülle, -kern und Luftführung

Auf Grund der hohen Temperaturen oberhalb von 120 °C sind die meisten Teile des HTSS vollkommen sauber gebrannt, so dass keine ungewollten Luftströmungen erkannt werden konnten. Dies gilt unter anderem für die Heißluftausschleusung (Bild 112), den HTSS-Deckel der Kern- und Spülluft zur Heißluft sammelt (Bild 113), den Speicherkern, die Kernluft- (Bild 114) und die Heizwendelkanäle (Bild 115, links). Rechts in Bild 115 sind die Keramikfaserhülsen dargestellt, in denen die Heizwendeln durch den Spülluftspalt geführt werden. An Hand der nur teilweise verschmolzenen Klebebandreste hier kann man ableiten, dass die Maximaltemperaturen im Spülluftspalt 80 °C – 120 °C nicht überstiegen haben.



Bild 112:
Heißluftausschleusung nach Abschluss der Versuche.

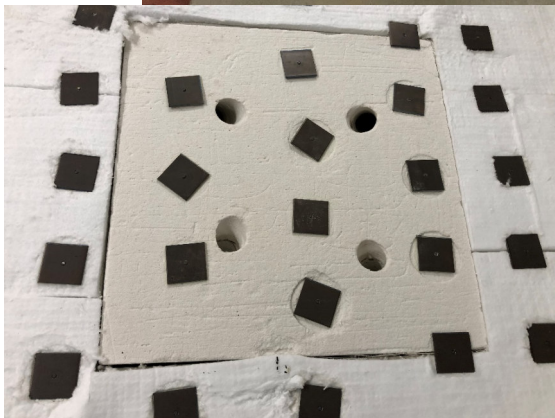


Bild 113:
HTSS-Deckel mit der Sammlung von Spül- und Kernluft nach Abschluss der Ver-
suche.



Bild 114:
HTSS-Speicherkern (links) und Kernluftkanal (rechts) nach Abschluss der Versuche.

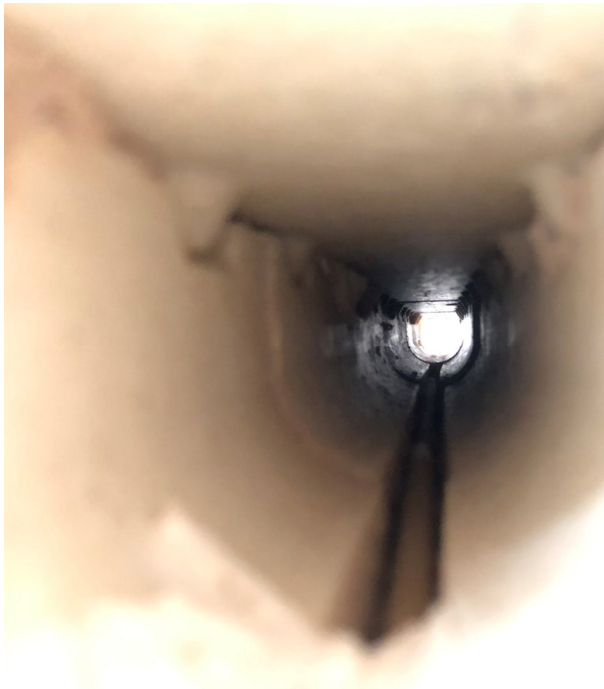


Bild 115:
Heizwendelkanal (links) und Keramikfaser-Schutzhülse zur Durchführung der Heizwendel durch den Spülluftspalt (rechts) nach Abschluss der Versuche.

Heißluftkreis

In Bild 116 ist der gesamte Heißluftkreis des HTSS wie bereits in Bild 96 in Abschnitt 2.5.1 dargestellt. Im (leeren) Filterkasten des Kreises hat sich ca. 1 dm³ eines brüchig-porösen Verbrennungs- / Verschwelung-Rückstands angesammelt (Bild 117). Hierbei handelt es sich scheinbar um einen unter Hitze aufschäumenden Dichtstoff aus der Brandschutzklappe nach der Heißluftausschleusung (Bild 118), die im Rahmen der Inbetriebnahme wegen zu hohen Temperaturen mehrfach ausgelöst wurde. Es ist fraglich, ob die Verwendung einer verhältnismäßig teuren und wartungsintensiven Brandschutzklappe im Rahmen eines fertigen Produktes mit bekannten Regelungseigenschaften notwendig wird. Zumal das Eindringen des Dichtschlams in den weiteren Heißluftkreis zu Verstopfungen und Leistungsreduzierungen am TWW-Wärmetauscher führen können, wie in Bild 119 erkennbar ist. Allerdings zeigt sich, dass auf den ersten ca. 1,5 m die Temperaturen ebenfalls für die Gummidichtungen der Wickelfalzrohre zu hoch waren, so dass diese entweder vollkommen porös wurden oder zu weißer Asche verbrannt waren. Für diesen Leitungsbereich muss zukünftig ein anderes Dichtverfahren mit höherer Temperaturstabilität zum Einsatz kommen

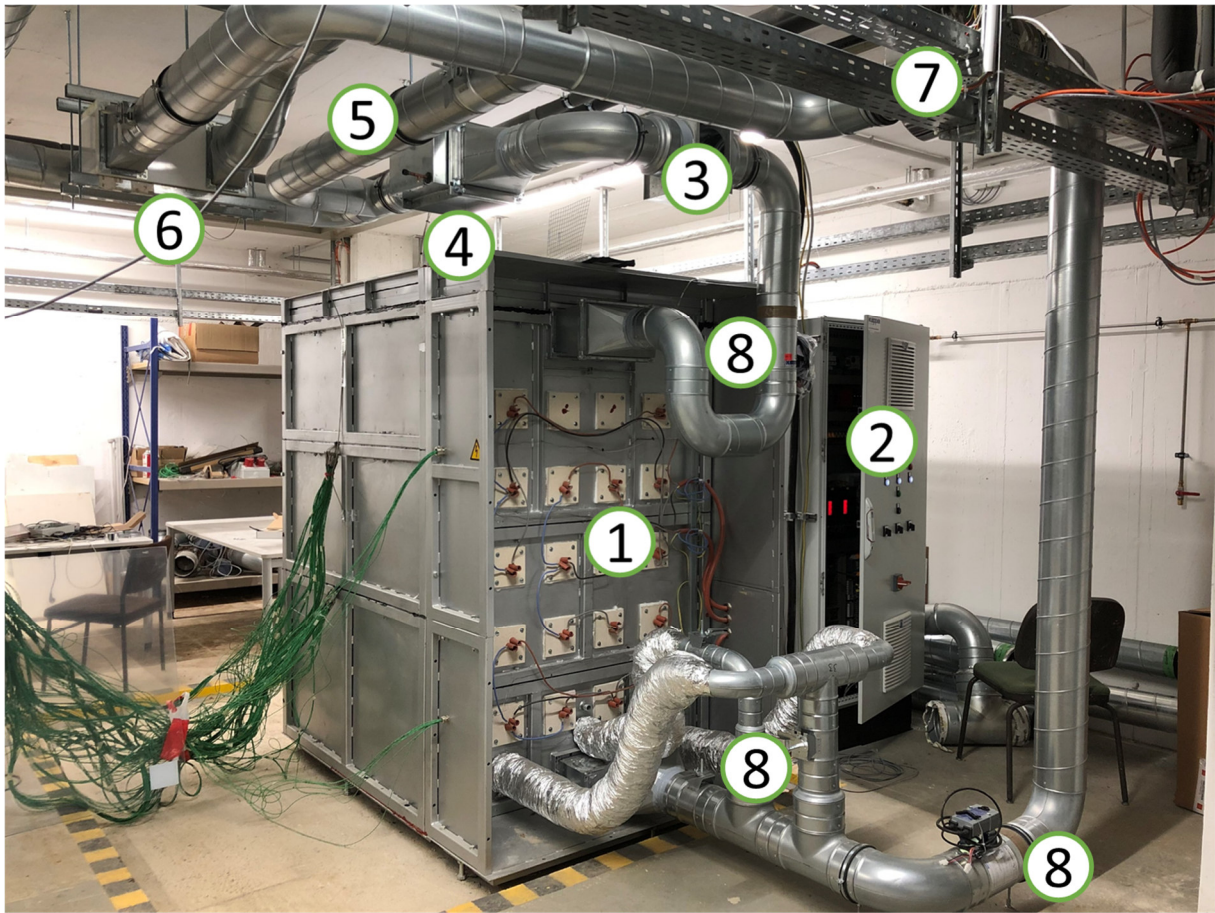


Bild 116:
 Fertiger HTSS inkl. Heißluftsystem (noch ungedämmt).
 1) kontaktierte Heizwendeln, 2) Schaltschrank, 3) Metallfilter, 4) TWW-Wärmetauscher, 5) HTSS-Sommerbypass, 6) Luft-Luft-Wärmetauscher zur Raumheizung, 7) Heißluft-Ventilator, 8) Brandschutzklappen (95 °C, 2x) Luft-Steuerklappen.



Bild 117:
 Rückstände im (leeren) Filterkasten des Heißluftkreises.

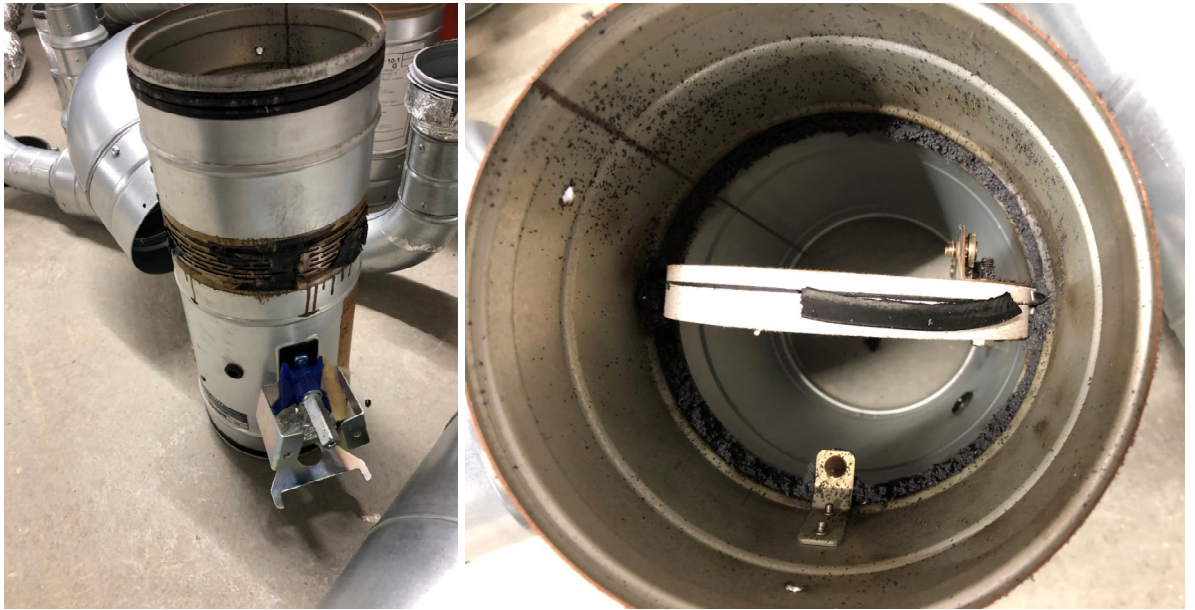


Bild 118:
 Außenansicht (links) und Innenansicht (rechts) der Brandschutzklappe nach der
 Heißluftausschleusung nach Durchführung der Versuche.



Bild 119:
 Dichtschaumreste der Brandschutzklappe angesammelt am TWW-Wärmetau-
 scher.

3 Lebenszyklusbasierte Analyse

Lebenszyklusbasierte Analysen mit Hilfe der Methode der Ökobilanz (engl. Life Cycle Assessment, LCA) [12] [13] unterstützen im Projekt, um entwicklungsbegleitend die mit den innovativen Windheizung 2.0-Komponenten verbundenen Umweltpotenziale über den Lebenszyklus ermitteln zu können. Die Analyse wird in Anlehnung an die im Bauwesen gängigen Normen zur Produktökobilanz [14] und Gebäudeökobilanz [15] durchgeführt. Zunächst werden hierfür Zielstellung (Warum soll analysiert werden?) und Untersuchungsrahmen (Was soll analysiert werden?) festgelegt. Im Rahmen der Sachbilanz (engl. Life Cycle Inventory, LCI) werden anschließend u.a. spezifische Ressourcen und Emissionen entlang der Wertschöpfungskette erfasst. Über das Instrument der Wirkungsabschätzung (engl. Life Cycle Impact Assessment, LCIA) und unter Zuhilfenahme sogenannter Wirkungsabschätzungsmodelle werden abschließend die resultierenden Wirkungen auf die Umwelt in verschiedenen Umweltthemen (sogenannten Wirkungskategorien bzw. Wirkungsindikatoren) quantifiziert.

Im Projekt wird hierzu grundsätzlich zwischen den folgenden Ebenen unterschieden:

- Produktebene: Ökologische Analyse der entwickelten und innovativen Windheizung 2.0-Komponenten – Produktökobilanz in Anlehnung an DIN EN 15804 [14];
- Konzeptebene: Ökologische Analyse von Gebäudekonzepten zur Wärmeversorgung, die die innovativen Windheizung 2.0-Komponenten integrieren – Gebäudeökobilanz in Anlehnung an DIN EN 15978 [15].

Nachfolgende werden die wichtigsten Randbedingungen bzw. Festlegungen zur Ermittlung der ökologischen Umweltwirkungen für die Produktebene sowie die Konzeptebene im Projekt erläutert.

3.1 Windheizung 2.0-Komponenten (Produktebene)

3.1.1 Zielstellung

Ziel der Ökobilanz auf Produktebene ist die entwicklungsbegleitende Analyse der Windheizung 2.0-Komponenten (bzw. Prototypen). Hierbei werden relevante ökologische Einflussgrößen und Hot Spots für die Produktentwicklung entlang des jeweiligen Produktlebenszyklus identifiziert. Zielgruppen der Analyse sind sowohl die im Projekt beteiligten Hersteller als auch Forschungspartner der Produktentwicklung. Des Weiteren fließen die Ergebnisse in das Planungs- und Nachweistool (AP 5) ein und werden dort als Hintergrundinformationen für die ökologische Analyse verschiedener Windheizung 2.0-Konzepte genutzt.

Die Ergebnisse sind zur Kommunikation nach intern und extern bestimmt. Eine kritische Prüfung gemäß DIN EN ISO 14040/14044 [12], [13] wurde nicht durchgeführt.

3.1.2 Technische Systembeschreibung

Umfassende technische Systembeschreibungen finden sich im Projektbericht in den Kapiteln 2.1 und 2.2. Es werden die folgenden Varianten der Windheizung 2.0-Komponenten analysiert:

- Hochtemperatur-Steinspeicher (HTSS)
- Bauteilaktivierung für den Neubau (für Decken und Innenwände)
- Bauteilaktivierung für die Sanierung (für Decken und Innenwände)

3.1.3 Funktion und funktionelle Einheit

Für die Analyse von Umweltpotenzialen im Rahmen der Ökobilanz wird eine Bezugsgröße für die Ergebnisdarstellung, die sogenannte funktionelle Einheit, zu Grunde gelegt. Die funktionelle Einheit repräsentiert eine quantifizierbare Größe zur Abbildung der Funktion des untersuchten Produktes. Im Rahmen der Produktökobilanz im Bauwesen wird häufig auch die deklarierte Einheit genutzt [14], da sich die Funktionalität vielfältigster Bauprodukte häufig erst im Kontext des Gebäudes näher beziffert werden kann und unter Umständen auch größeren Schwankungsbreiten unterliegt.

Für den Hochtemperatur-Steinspeicher (HTSS) wird die deklarierte Einheit in Höhe von einem Stück Speicher (1 St.), mit einem definierten Gewicht (5,4 t) und einer definierten maximalen Speicherkapazität (max. 640 kWh) herangezogen.

Für die Abbildung der Systeme zur Bauteilaktivierung in Neubau und Sanierung wird die deklarierte Einheit in Höhe von einem Quadratmeter (1 m²) Bauteilfläche zu Grunde gelegt.

3.1.4 Definition der Systemgrenzen

Die ökologische Bewertung der Windheizung 2.0-Komponenten entlang ihres Lebenszyklus richtet sich nach den Lebenszyklusmodulen gemäß DIN EN 15804 [14] und DIN EN 15978 [15]. Es werden die folgenden Lebenszyklusmodule berücksichtigt:

- Herstellung (Modul A1-A3),
- Ersatz und Austausch (Modul B4)
- Abfallbehandlung für Wiederverwendung, Rückgewinnung und Recycling (Modul C3)
- Entsorgung (Modul C4) und
- Vorteile und Belastungen aus Wiederverwendungs-, Rückgewinnungs-, und/oder Recyclingpotenzialen (Modul D).

Als Betrachtungszeitraum der Ökobilanz wird abweichend von Standard-Vorgaben der Nachhaltigkeitszertifizierung in Deutschland [16] ein projektspezifischer Betrachtungszeitraum von 25 Jahren gewählt. Dieser Zeitraum entspricht der gemäß Herstellerangaben geforderten Mindestlebensdauer bzw. Zielgröße für die Lebensdauer der neu entwickelten innovativen Windheizung 2.0-Komponenten.

3.1.5 Abschätzungen und Annahmen

Ersatz und Austausch von Komponenten (Modul B4): Für den Hochtemperatur-Steinspeicher (HTSS) im Prototypen-Status wird ein pauschaler Ansatz in Höhe von 4,19 % der Umweltwirkungen aus dem Lebenszyklusmodul A1-A3 (Herstellung) gewählt. Die Daten basieren auf einem errechneten Mittelwert aus den Bausteinen Wärme und Raumluftechnik gemäß VDI 2067 [17]. Für die Varianten der Bauteilaktivierung werden keine Komponenten für Ersatz/Austausch im Rahmen des Betrachtungszeitraumes von 25 Jahren fällig.

Energieaufwand Fertigung (Modul A3): Für den Zusammenbau des Hochtemperatur-Steinspeichers wird ein Energiebedarf (Strom) in Höhe von ca. 40 MJ abgeschätzt und angesetzt. Ein potenzieller Energiebedarf für die Fertigung der Bauteilaktivierung wurde nicht ermittelt und wird nicht berücksichtigt.

Szenarien für das Lebensende (Modul C): In Anlehnung an Vorgaben zur Ökobilanz gängiger Zertifizierungssysteme für Nachhaltigkeit von Gebäuden [16] werden für das Lebensende materialgruppenspezifische Ansätze genutzt:

- Mineralische Materialien: Stoffliche Verwertung und/oder Entsorgung (Inertstoffdeponie)
- Metalle: Stoffliche Verwertung/Recycling
- Materialien mit Heizwert: Thermische Verwertung
- Alle sonstigen Materialien: Entsorgung (Inertstoffdeponie)

Spezifische Legierungen wie Chrom-/Nickel-/Aluminium-/Stahl-Legierungen (Cr-Ni / St-Cr-Al) werden über Standardprozesse für Metalle am Lebensende abgebildet. Es werden keine spezifischen Prozesse für die hydrometallurgische stoffliche Verwertung aufgrund fehlender belastbarer Umweltinformationen für das Lebensende berücksichtigt. Aufwendungen für den Rückbau (Modul C1) der Windheizung 2.0-Komponenten und den Transport (Modul C2) zum entsorgenden oder verwertenden Unternehmen sind ebenfalls nicht berücksichtigt.

Umgang mit Gutschriften am Lebensende (Modul D): Im Falle von thermischer Verwertung von Materialien werden sogenannten Gutschriften für die Vermeidung des Einsatzes von primären Energieträgern angesetzt. Im Falle stofflicher Verwertung von Materialien werden Gutschriften für den vermiedenen Einsatz primärer Rohstoffe berücksichtigt. Für die Ermittlung der Höhe der jeweiligen Gutschriften werden Verlustraten am Lebensende berücksichtigt, um diese nicht zu überschätzen.

3.1.6 Einschätzung zur Datenqualität

Anforderungen an die Datenqualität sollen im Rahmen der Ökobilanz u. a. für folgende Parameter dokumentiert werden [14]:

- Zeitbezogene, geografische und technologische Repräsentativität
- Art der Datenaufnahme (gemessen, geschätzt, berechnet)
- Genauigkeit der genutzten Daten (Präzision und Richtigkeit)
- Vollständigkeit der genutzten Daten (z. B. Anteil Primärdaten)

Ziel ist hierbei die Sicherstellung von Repräsentativität, Konsistenz und Nachvollziehbarkeit der verwendeten Daten.

Massen- und Energieströme der zu analysierenden Windheizung 2.0-Komponenten sind auf Basis der technischen Systembeschreibungen erfasst. Es liegen hauptsächlich Primärdaten im Zuge von Herstelleranfragen für die verschiedenen Komponenten vor. Die erhobenen und genutzten Daten sind zeitlich repräsentativ für die Jahre 2018 bis 2021 sowie geografisch repräsentativ für Deutschland. Fehlende Informationen bzw. Datenlücken wurden durch Expertenschätzung oder durch Werte aus der Sekundärliteratur geschlossen (z. B. Ersatz und Austausch). Die Datenqualität kann als gut eingestuft werden.

3.1.7 Systemraumerweiterung und Allokation

Im Hintergrundsystem enthaltene Systemraumerweiterungen und Allokationen für die verwendeten Datensätze und Produkt-EPDs sind den Dokumentationen der Datenbank GaBi zu entnehmen [18].

Im Vordergrundsystem wurden keine Allokationen vorgenommen. Systemraumerweiterungen werden unter Berücksichtigung des Lebenszyklusmoduls D gemäß DIN EN 15978 [15] angewendet. Sie beziehen sich auf die Substitution von Primärmaterialien im Rahmen der stofflichen Verwertung sowie von primären Energieträgern im Rahmen der thermischen Verwertung.

3.1.8 Sachbilanz und Modellbildung

Für die Modellbildung der Windheizung 2.0-Komponenten wird das prozess- und flussbezogene Datenbank- und Softwaresystem GaBi ts v. 10 mit Service Pack (SP) SP40 [18] genutzt. Das Datenbank- und Softwaresystem findet u. a. Anwendung für die Erstellung von Umweltproduktdeklarationen (EPD) für Bauprodukte. Weiterhin ist das Datenbanksystem Grundlage der generischen Daten der deutschen Bauprodukt-Datenbank ÖKOBAUDAT [19], die im Rahmen der Konzeptbewertung (vergleiche Kapitel 3.2) genutzt wird. Die detaillierte Aufstellung der für die Windheizung 2.0-Komponenten genutzten Eingangsgrößen (Inputgrößen) können dem Anhang A.2 entnommen werden:

- Hochtemperatur-Steinspeicher: Anhang A.2.1,
- Bauteilaktivierung Decke: Anhang A.2.2 (Neubau) und Anhang A.2.4 (Sanierung),
- Bauteilaktivierung Wand: Anhang A.2.3 (Neubau) und Anhang A.2.5 (Sanierung).

3.1.9 Wirkungsabschätzung und Interpretation

Für die Wirkungsabschätzung werden international akzeptierte Umweltindikatoren und Wirkungskategorien verwendet, die u. a. auch im Rahmen der Umweltproduktdeklaration Anwendung finden [14]. Ihnen liegen belastbare wissenschaftliche Modelle zur Wirkungsabschätzung zu Grunde. Es werden die Umweltindikatoren und Wirkungskategorien gemäß DIN EN 15804+A1 [14] genutzt.

Für die Studie werden die Ergebnisse der Ökobilanz für die folgenden Wirkungskategorien und Umweltindikatoren mit Relevanz für die untersuchten Windheizung 2.0-Komponenten ausgewiesen:

- Einsatz nicht erneuerbarer Primärenergie, total (PENRT) in [MJ]: als potenzieller Beitrag zur stofflichen und energetischen Nutzung von nicht erneuerbaren primärenergetischen Ressourcen sowie
- Treibhauspotenzial (GWP) in [kg CO₂-Äquivalenten]: als potenzieller Beitrag zum Treibhauseffekt (Klimaerwärmung) beziehungsweise zur globalen Klimaänderung und zum globalen Klimawandel.

3.1.10 Auswertung und Interpretation

Nachfolgend sind lebenszyklusbasierte Ergebnisse entsprechend der ausgewählten Umweltwirkungsindikatoren für den Hochtemperatur-Steinspeicher (HTSS) und die BTA-Varianten dargestellt.

Hochtemperatur-Steinspeicher (HTSS): Bild 120 zeigt die potenziellen Beiträge der einzelnen Lebenszyklusmodule zum Klimawandel (GWP) sowie für den kompletten Lebenszyklus über einen Betrachtungszeitraum von 25 Jahren. Haupttreiber für die lebenszyklusbezogenen Umweltwirkungen ist die Herstellung (blauer Balken). Produktoptimierungen lassen sich bei weiterer Auflösung der Ökobilanzergebnisse nach den einzelnen Komponenten und Bestandteilen des Hochtemperatur-Steinspeichers (Bild 121) ableiten. Insbesondere die Steine des Speicherkerns (hellblaues Kreissegment) aber auch Dämmung, Gehäuse und Heizwendel bieten unter Umständen Ansatzpunkte für die ökologische Produktoptimierung durch veränderte Materialwahl und/oder schlankere Bauteilgestaltung. Wechselwirkungen in Bezug auf die notwendige zu erhaltene Wärmespeicherfähigkeit der Komponente sind hierbei eine Herausforderung und zu berücksichtigen.

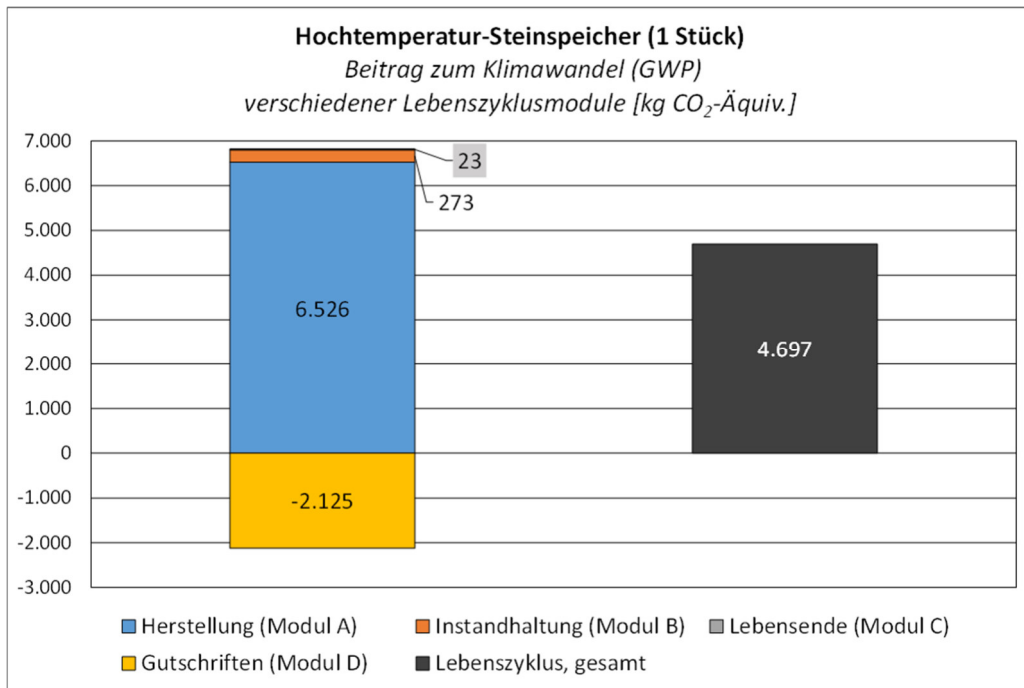


Bild 120:
Beitrag zum Klimawandel (GWP) für den Hochtemperatur-Steinspeicher, je 1 Stück mit 5 Tonnen Speichermasse: linke Seite getrennt nach Lebenszyklusmodulen (A-D), rechte Seite aggregierter Wert für den Lebenszyklus gesamt.

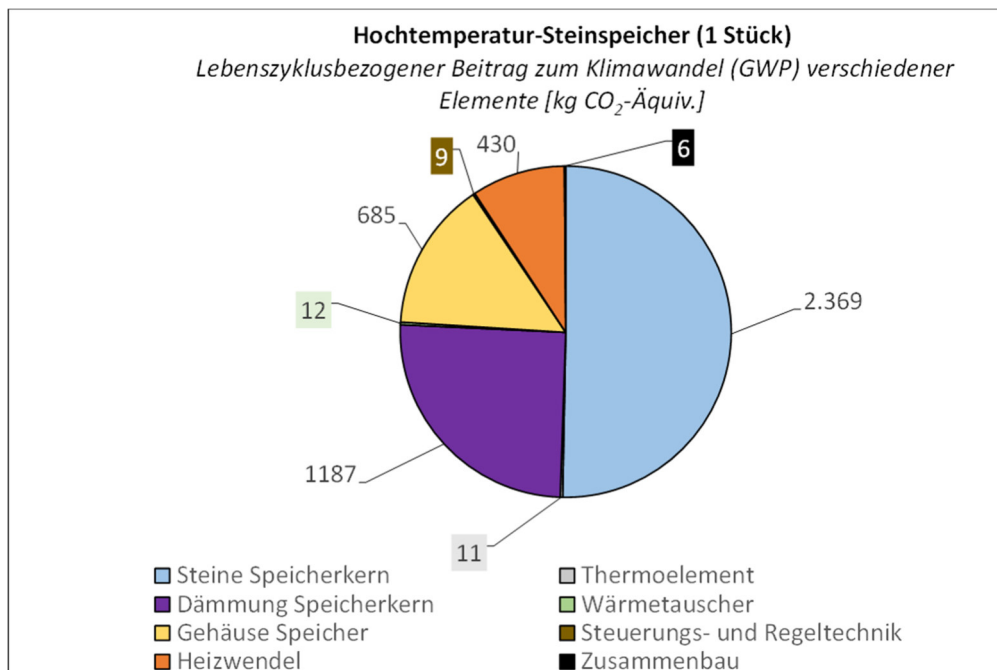


Bild 121:
Beitrag zum Klimawandel (GWP) für den Hochtemperatur-Steinspeicher, je 1 Stück mit 5 Tonnen Speichermasse: getrennt nach Elementen des Steinspeichers.

Bauteilaktivierung (BTA), Neubau Decke, DELTA:

Bild 122 zeigt die potenziellen Beiträge der einzelnen Lebenszyklusmodule zum Klimawandel (GWP) sowie für den kompletten Lebenszyklus über einen Betrachtungszeitraum von 25 Jahren für die BTA Neubau Decke. Haupttreiber für die lebenszyklusbezogenen Umweltwirkungen ist auch hier die Herstellung (blauer Balken). Produktoptimierungen lassen sich bei weiterer Auflösung der Ökobilanzergebnisse nach den einzelnen Komponenten und Bestandteilen der BTA (Bild 123) ableiten. Insbesondere der Einsatz des zusätzlichen Betons, als auch die Heizrohre bieten unter Umständen Ansatzpunkte für die ökologische Produktoptimierung durch veränderte Materialwahl und/oder schlankere Bauteilgestaltung. Wechselwirkungen in Bezug auf die notwendige zu erhaltene Wärmespeicherfähigkeit der Komponente sind hierbei eine Herausforderung und zu berücksichtigen.

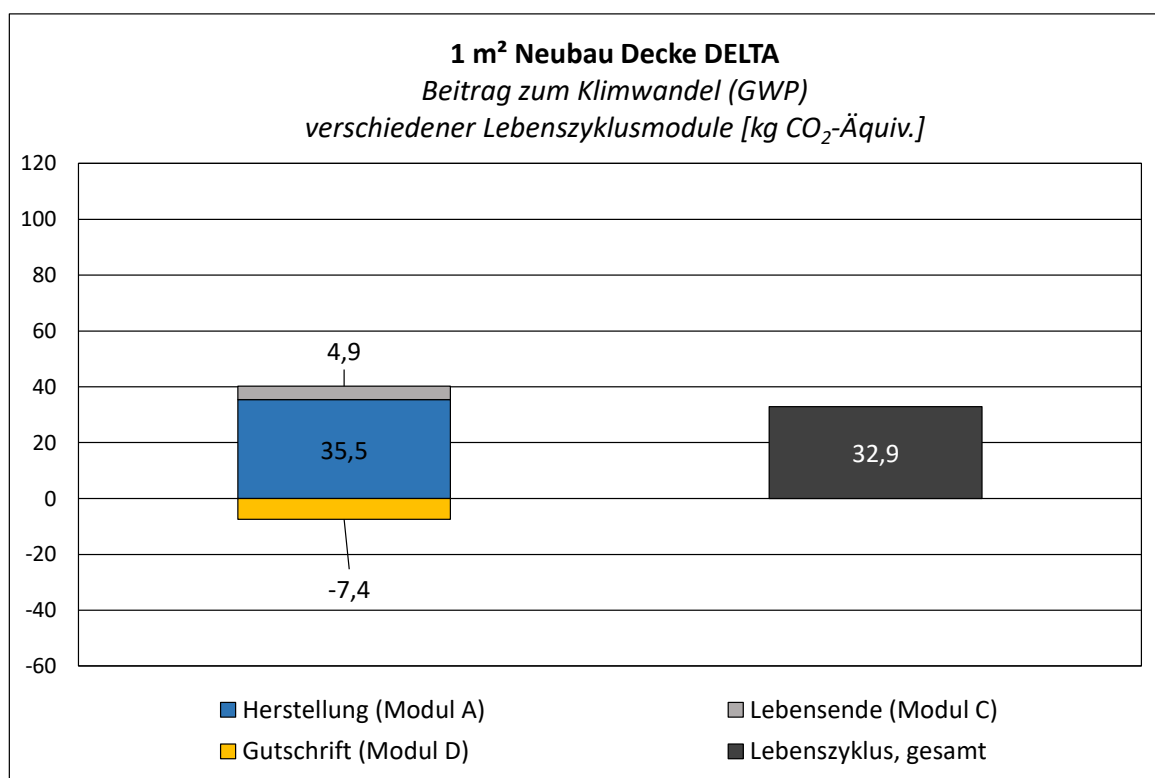


Bild 122:
Beitrag zum Klimawandel (GWP) für das DELTA der Neubau Decke, je 1 m²:
linke Seite getrennt nach Lebenszyklusmodulen (A-D), rechte Seite aggregierter
Wert für den Lebenszyklus gesamt.

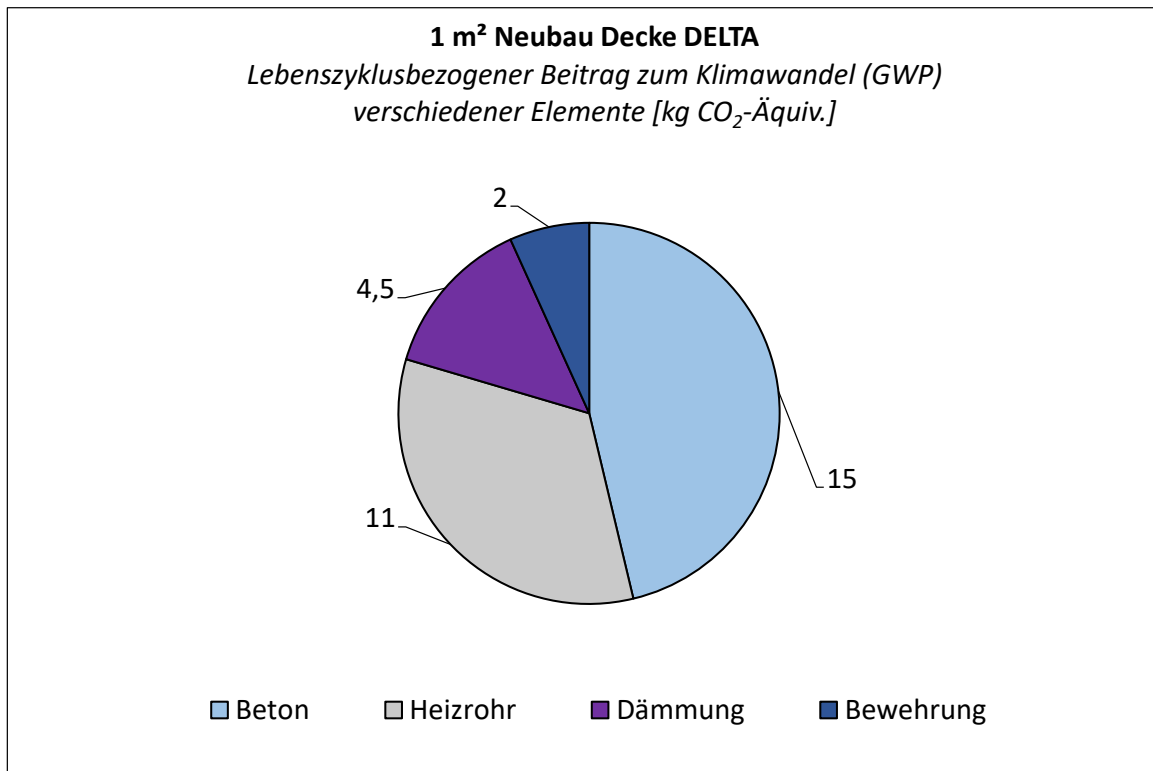


Bild 123:

Beitrag zum Klimawandel (GWP) für das DELTA der Neubau Decke, je 1 m²: getrennt nach Elementen der Decke.

Bauteilaktivierung (BTA), Sanierung Decke: Bild 124 zeigt die potenziellen Beiträge der einzelnen Lebenszyklusmodule zum Klimawandel (GWP) sowie für den kompletten Lebenszyklus über einen Betrachtungszeitraum von 25 Jahren für die BTA Sanierung Decke. Haupttreiber für die lebenszyklusbezogenen Umweltwirkungen ist auch hier die Herstellung (blauer Balken). Produktoptimierungen lassen sich bei weiterer Auflösung der Ökobilanzergebnisse nach den einzelnen Komponenten und Bestandteilen der BTA (Bild 125) ableiten. Insbesondere der Einsatz der zusätzlichen Dämmung, der Gipskartonplatten sowie der Be- und Entladeprofile bieten unter Umständen Ansatzpunkte für die ökologische Produktoptimierung durch veränderte Materialwahl und/oder schlankere Bauteilgestaltung. Wechselwirkungen in Bezug auf die notwendige zu erhaltene Wärmespeicherfähigkeit der Komponente sind hierbei eine Herausforderung und zu berücksichtigen.

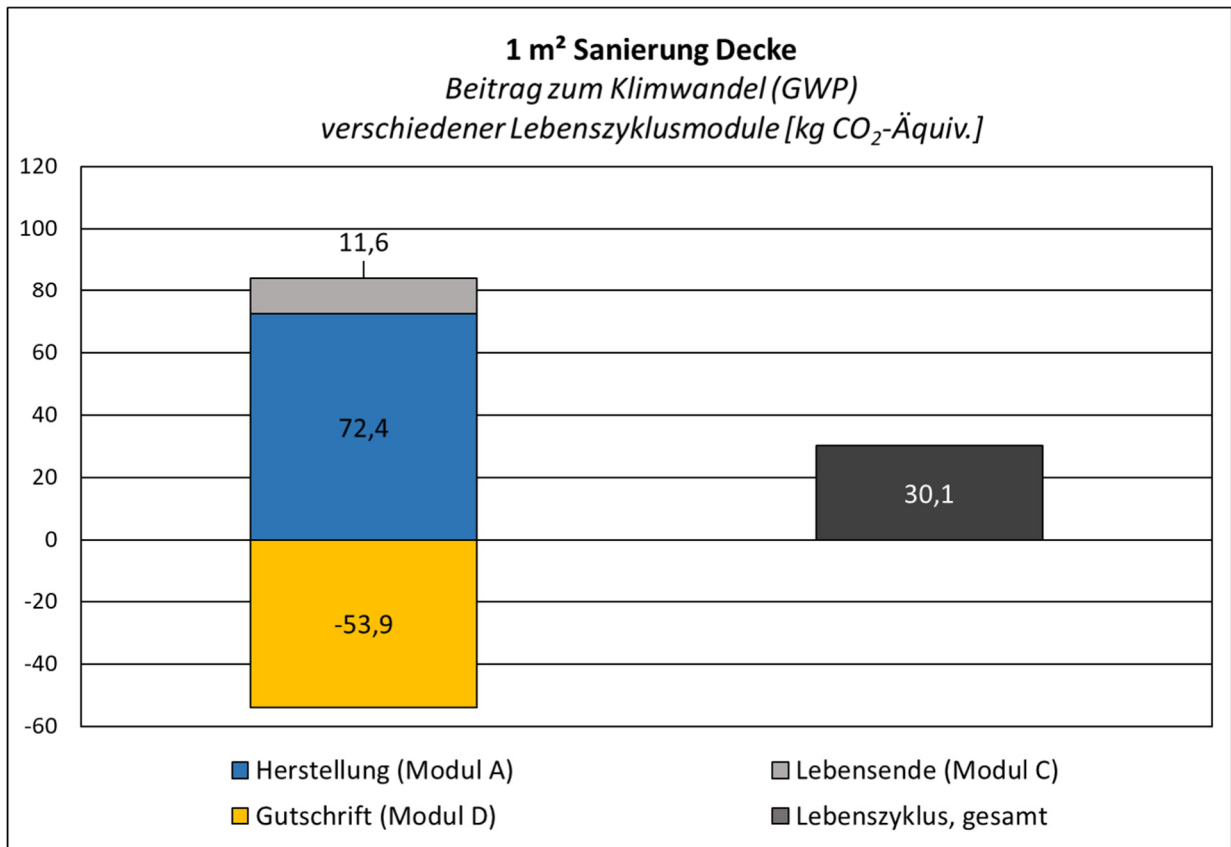


Bild 124:
 Beitrag zum Klimawandel (GWP) für die Sanierung der Decke, je 1 m²: linke Seite getrennt nach Lebenszyklusmodulen (A-D), rechte Seite aggregierter Wert für den Lebenszyklus gesamt.

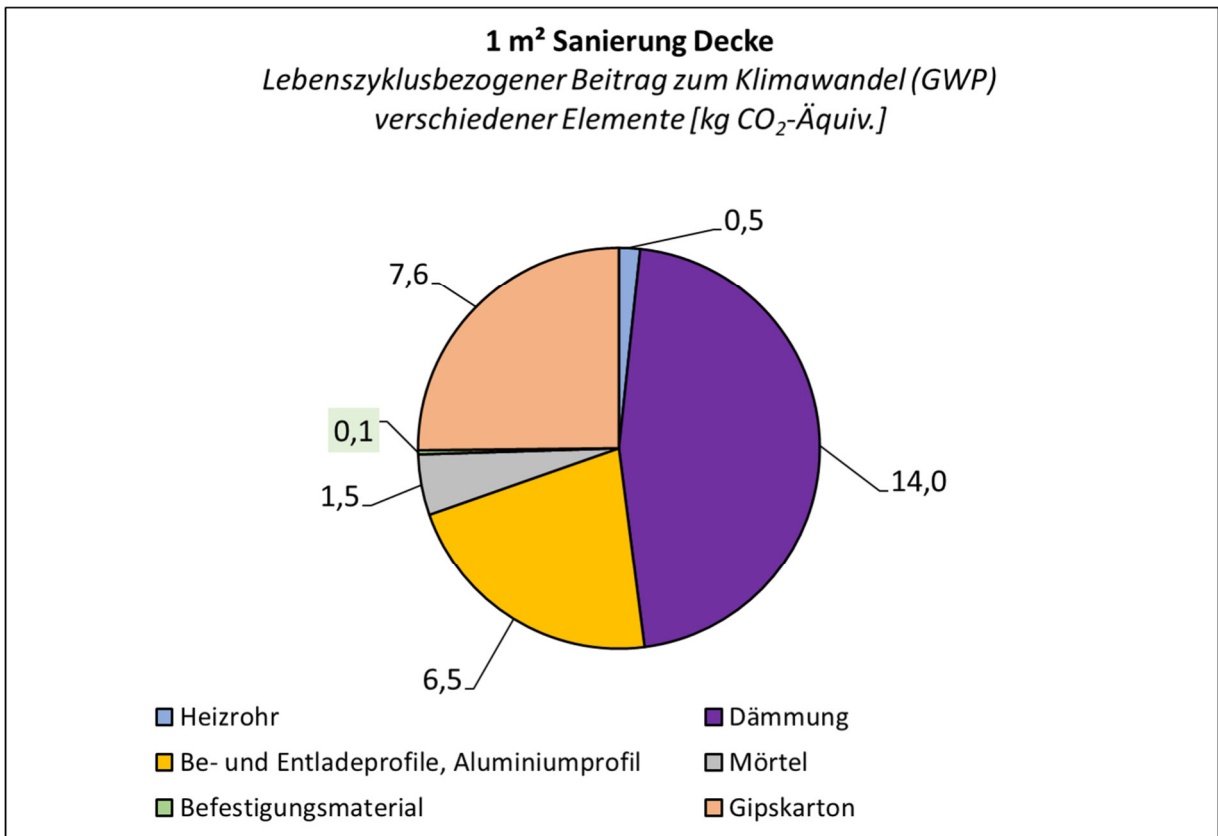


Bild 125:
 Beitrag zum Klimawandel (GWP) für die Sanierung der Decke, je 1 m²: getrennt nach Elementen der Decke.

Bauteilaktivierung (BTA), Neubau Wand, DELTA: Bild 126 zeigt die potenziellen Beiträge der einzelnen Lebenszyklusmodule zum Klimawandel (GWP) sowie für den kompletten Lebenszyklus über einen Betrachtungszeitraum von 25 Jahren für die BTA Neubau Wand. Haupttreiber für die lebenszyklusbezogenen Umweltwirkungen ist auch hier die Herstellung (blauer Balken). Produktoptimierungen lassen sich bei weiterer Auflösung der Ökobilanzergebnisse nach den einzelnen Komponenten und Bestandteilen der BTA (Bild 127) ableiten. Insbesondere der Einsatz der zusätzlichen Dämmung, der Gipskartonplatten, der Heizrohre sowie die neuen Klimasan-Profile für die Entladung bieten unter Umständen Ansatzpunkte für die ökologische Produktoptimierung durch veränderte Materialwahl und/oder schlankere Bauteilgestaltung. Wechselwirkungen in Bezug auf die notwendige zu erhaltene Wärmespeicherfähigkeit der Komponente sind hierbei eine Herausforderung und zu berücksichtigen.

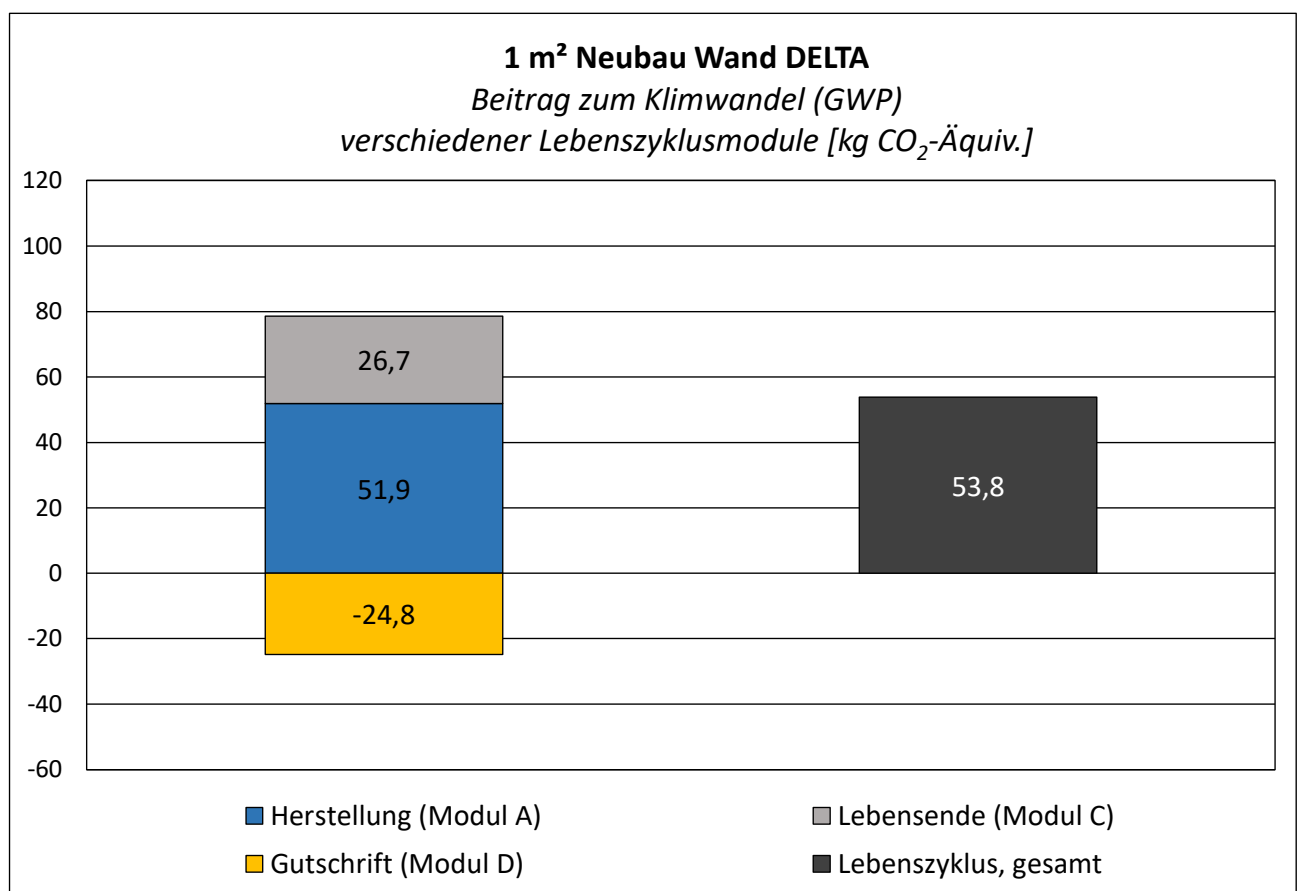


Bild 126:
 Beitrag zum Klimawandel (GWP) für das DELTA der Neubau Wand, je 1 m²:
 linke Seite getrennt nach Lebenszyklusmodulen (A-D), rechte Seite aggregierter
 Wert für den Lebenszyklus gesamt.

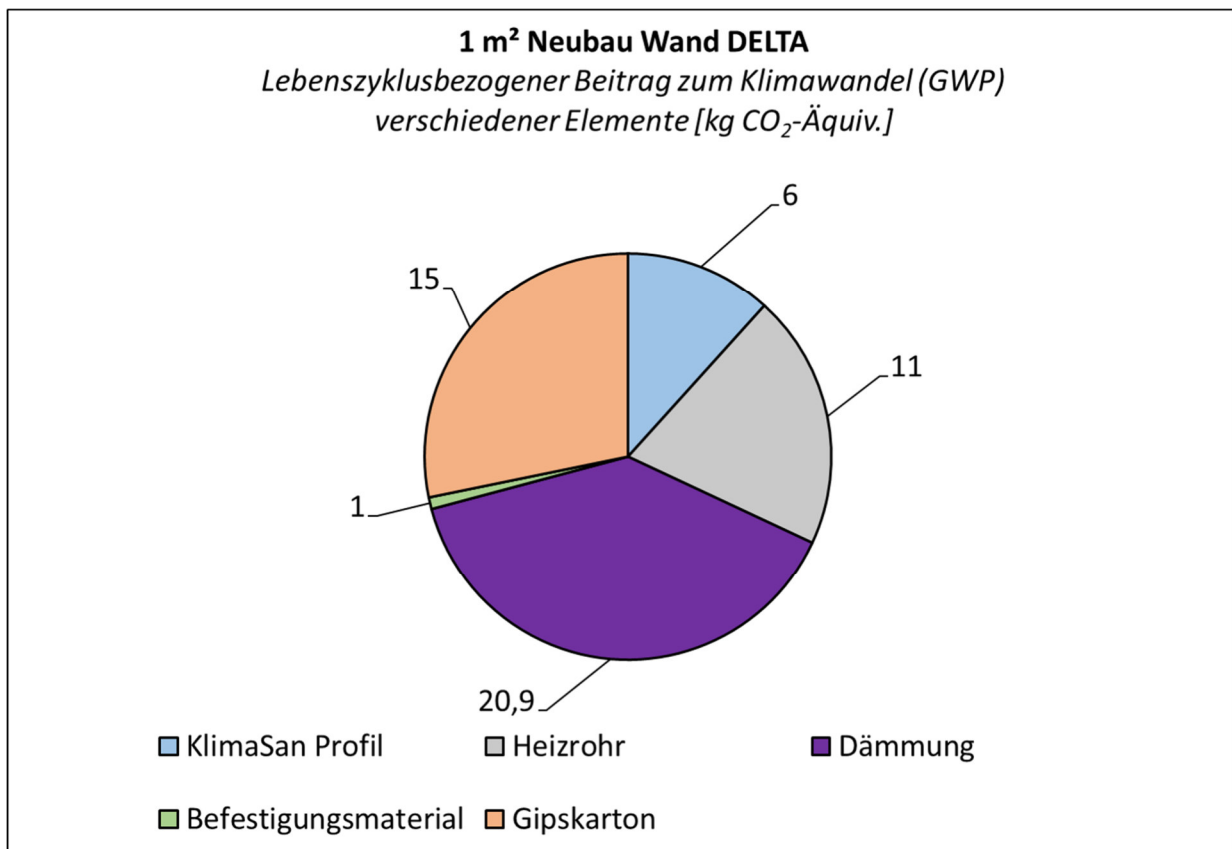


Bild 127:
 Beitrag zum Klimawandel (GWP) für das DELTA der Neubau Wand, je 1 m²: getrennt nach Elementen der Wand.

Bauteilaktivierung (BTA), Sanierung Wand: Bild 128 zeigt die potenziellen Beiträge der einzelnen Lebenszyklusmodule zum Klimawandel (GWP) sowie für den kompletten Lebenszyklus über einen Betrachtungszeitraum von 25 Jahren für die BTA Sanierung Wand. Haupttreiber für die lebenszyklusbezogenen Umweltwirkungen ist auch hier die Herstellung (blauer Balken). Produktoptimierungen lassen sich bei weiterer Auflösung der Ökobilanzergebnisse nach den einzelnen Komponenten und Bestandteilen der BTA (Bild 129) ableiten. Insbesondere der Einsatz der zusätzlichen Dämmung, der Gipskartonplatten zur Abdeckung sowie der Heizrohre und der Klimasan-Profile für die aktive Entladung bieten unter Umständen Ansatzpunkte für die ökologische Produktoptimierung durch veränderte Materialwahl und/oder schlankere Bauteilgestaltung. Wechselwirkungen in Bezug auf die notwendige zu erhaltene Wärmespeicherfähigkeit der Komponente sind hierbei eine Herausforderung und zu berücksichtigen.

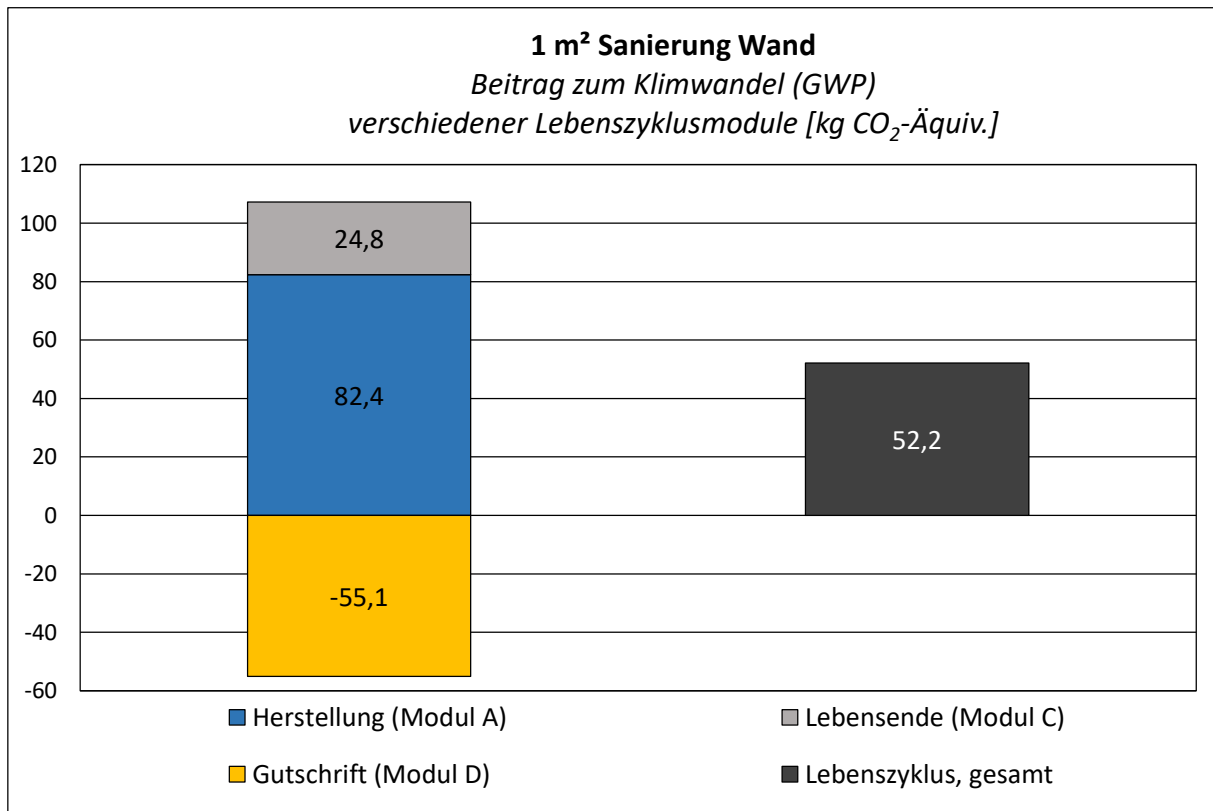


Bild 128:

Beitrag zum Klimawandel (GWP) für die Sanierung der Wand, je 1 m²: linke Seite getrennt nach Lebenszyklusmodulen (A-D), rechte Seite aggregierter Wert für den Lebenszyklus gesamt.

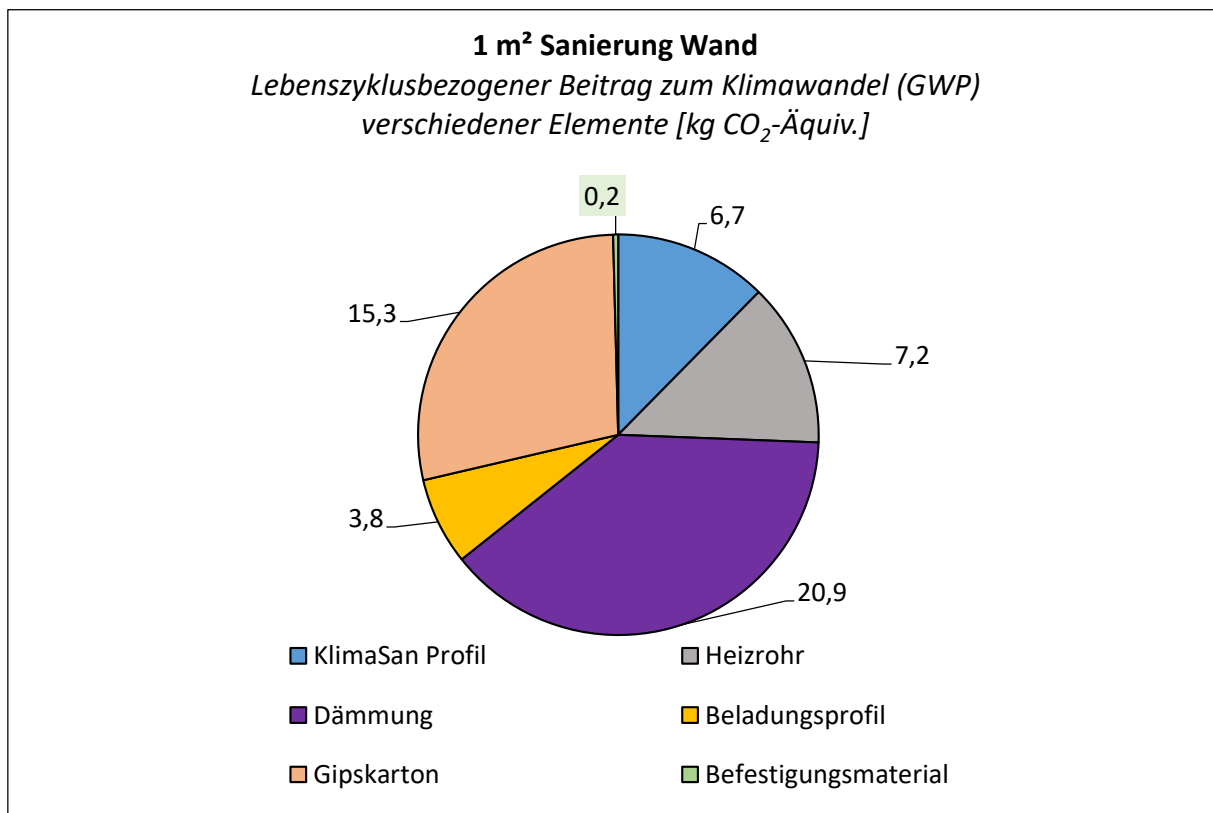


Bild 129:
 Beitrag zum Klimawandel (GWP) für die Sanierung der Wand, je 1 m²: getrennt nach Elementen der Wand.

BTA-Varianten in der Gegenüberstellung: Bild 130 bis Bild 133 zeigen die verschiedenen Varianten der Bauteilaktivierung in der Gegenüberstellung – sowohl für die potenziellen Beiträge der einzelnen Lebenszyklusmodule zum Klimawandel (GWP) als auch zur Nutzung von nicht erneuerbarer Primärenergie (PENRT). Die Wandlösungen der BTA zeigen im Schnitt höhere Umweltwirkungen als die Lösungen zur Aktivierung der Decke. Dies liegt unter anderem im vermehrten Einsatz von Metallen für die Wandlösungen begründet (z. B. über die notwendigen Be- und Entladeprofile). Sie weisen damit höhere potenzielle Umweltwirkungen in der Herstellung auf sowie höhere Gutschriften durch ein höheres stoffliches Verwertungspotenzial.

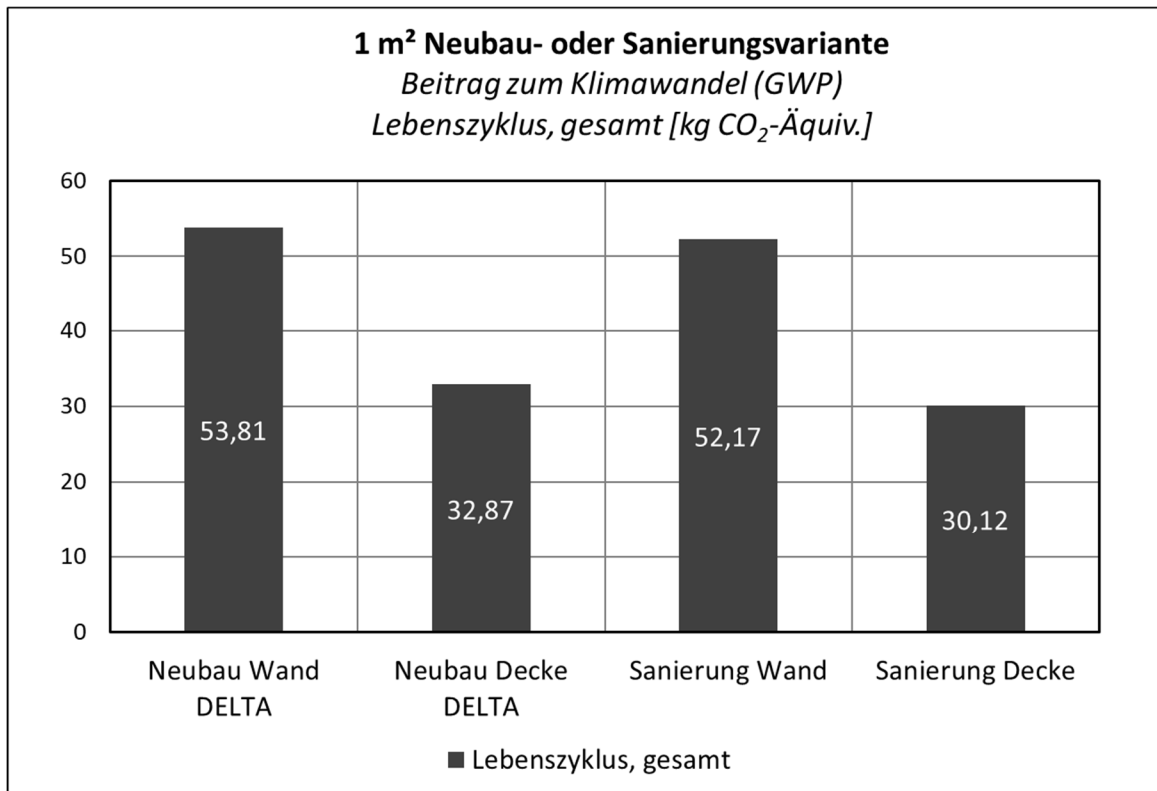


Bild 130:
 Beitrag zum Klimawandel (GWP) für die Varianten aggregiert über den Lebenszyklus (50 Jahre), je 1 m².

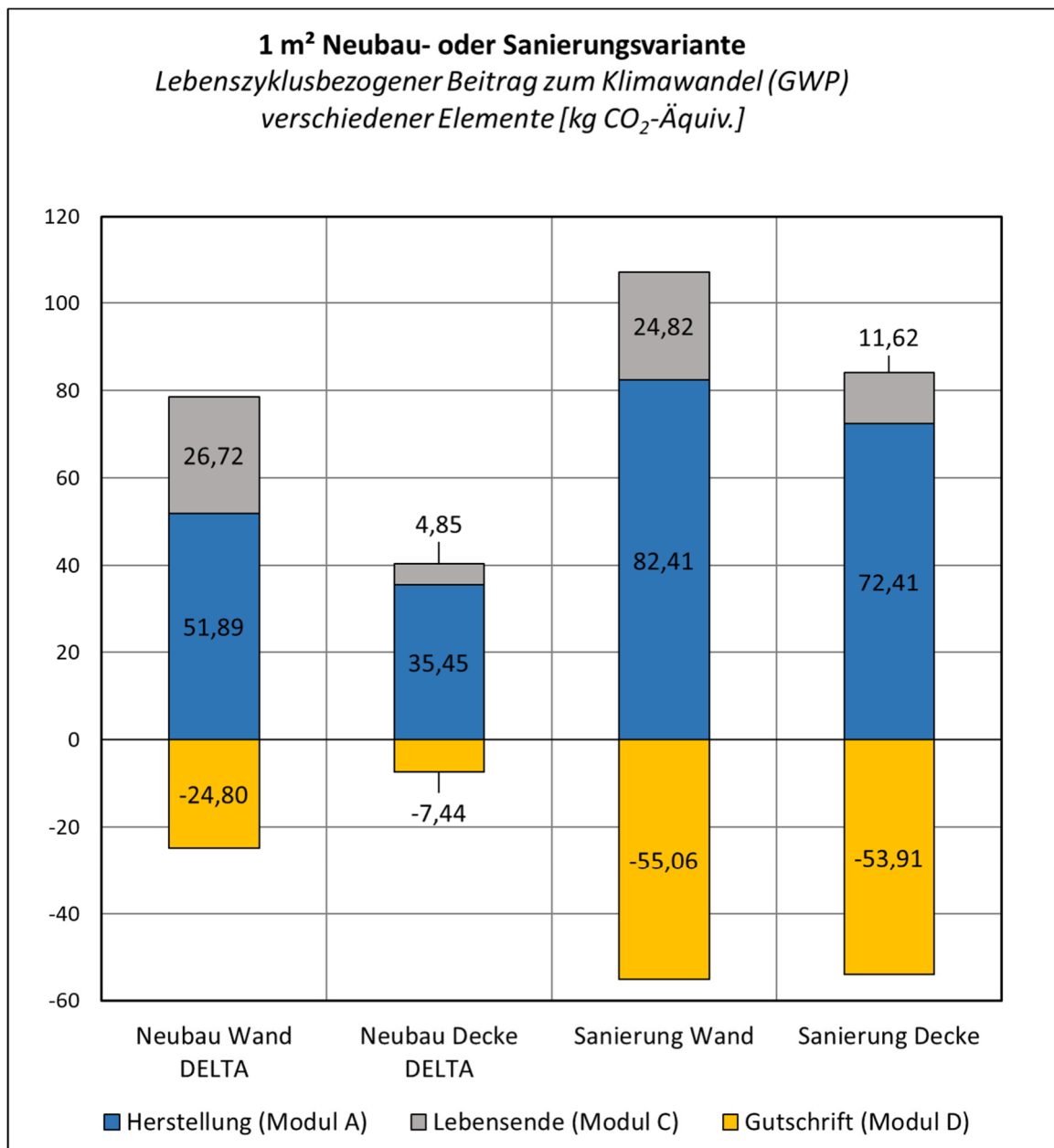


Bild 131:
 Beitrag zum Klimawandel (GWP) für die Varianten, je 1 m²: getrennt nach Lebenszyklusmodulen (A-D).

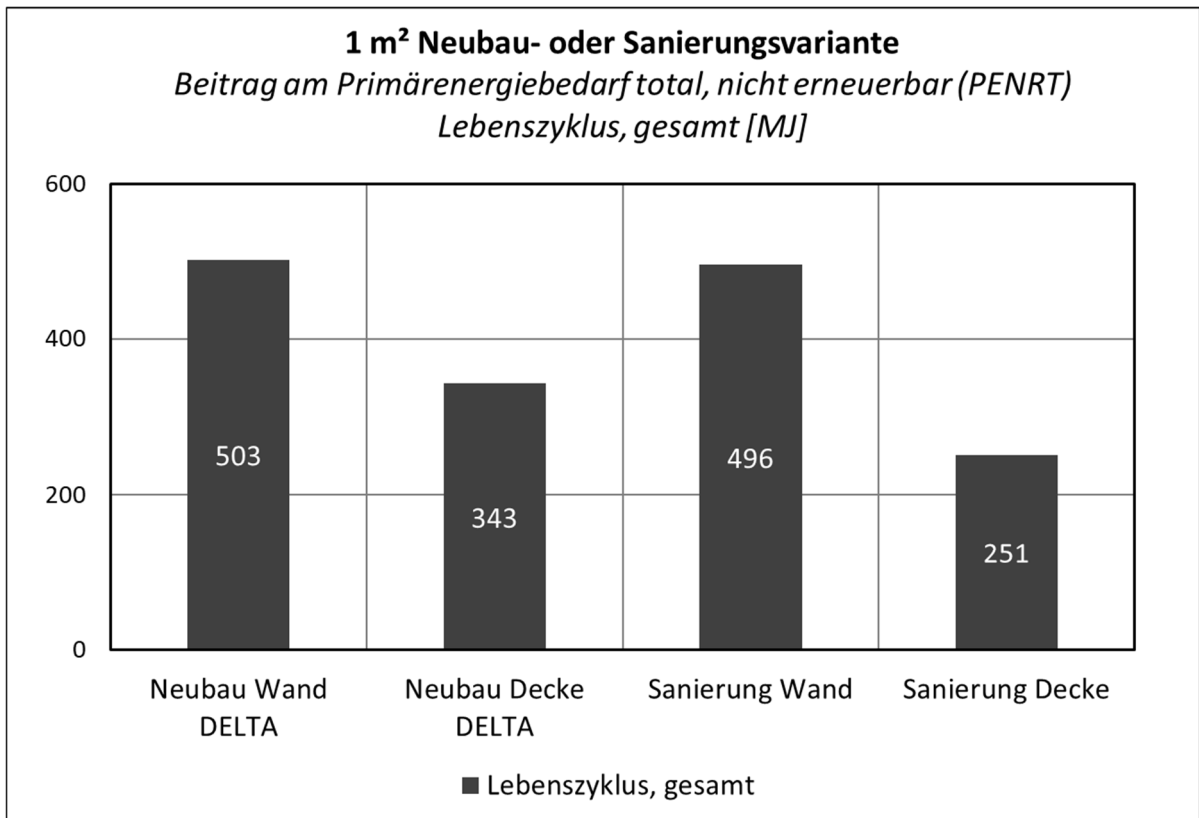


Bild 132:
 Beitrag am Primärenergiebedarf total, nicht erneuerbar (PENRT) für die Varianten aggregiert über den Lebenszyklus (50 Jahre), je 1 m².

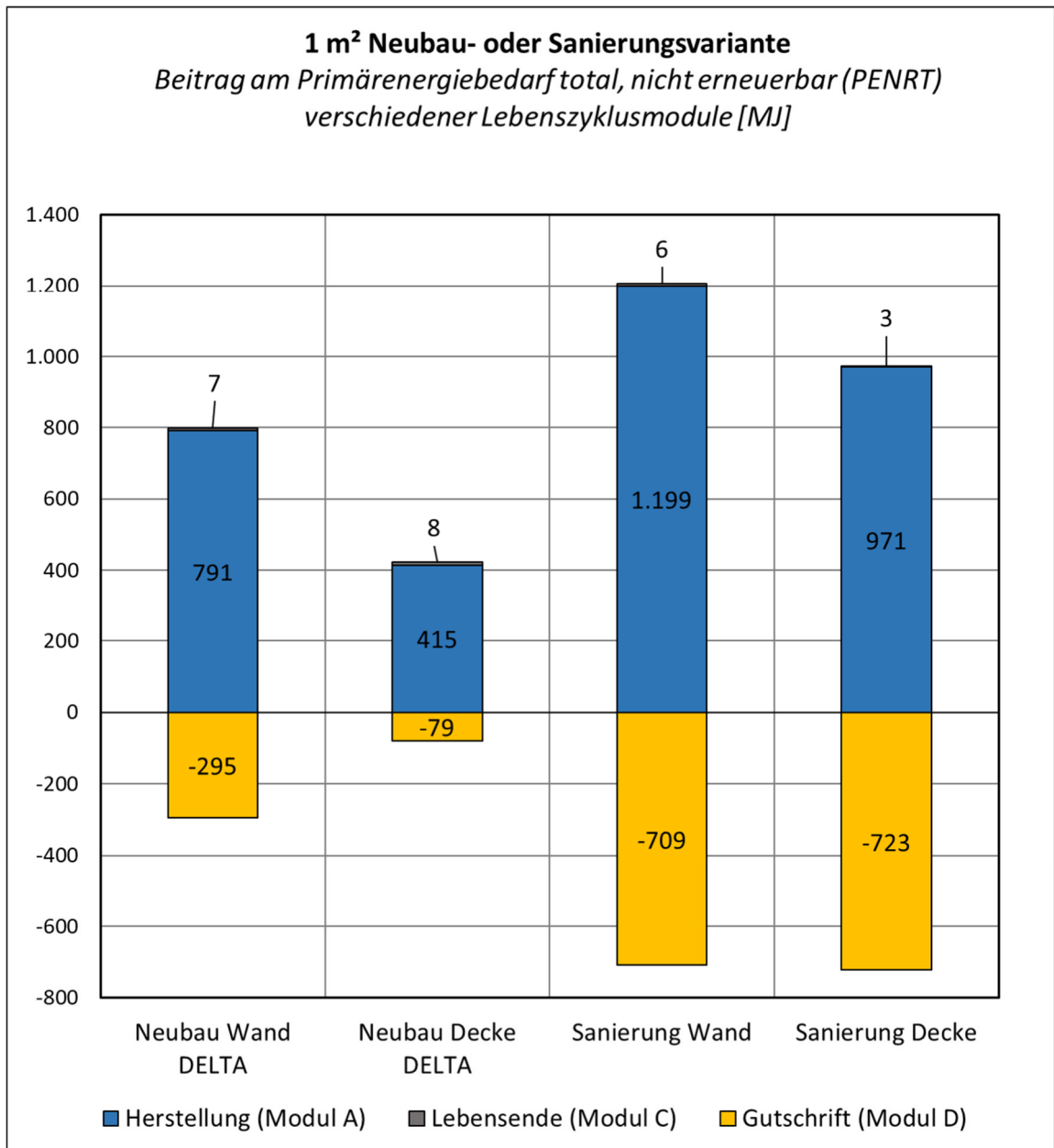


Bild 133:
Beitrag am Primärenergiebedarf total, nicht erneuerbar (PENRT), je 1 m²: getrennt nach Lebenszyklusmodulen (A-D).

3.2 Windheizung 2.0-Konzepte (Konzeptebene)

3.2.1 Zielstellung

Mit Hilfe der Ökobilanz soll insbesondere beantwortet werden, welche Umweltwirkungen sich über den Lebenszyklus für die festgelegten Varianten zur Windheizung 2.0 (WH) im Gebäudekontext ergeben. Hierzu werden verschiedene Varianten der Windheizung 2.0 (WH) im Gebäudekontext einer Referenz (GEG-Gebäude) gegenübergestellt.

Folgende Fragen sollen durch die ökologische Analyse geklärt werden:

- Lohnt sich der Einsatz der Windheizung 2.0-Komponenten und Konzepte aus ökologischer Perspektive über den Lebenszyklus?
- Welche zusätzlichen und/oder reduzierten potenziellen Umweltwirkungen stellen sich bei Nutzung der Windheizung 2.0-Konzepte ein?

Zur Analyse wird das Planungstool genutzt, in dessen Aufbau auch die methodischen Grundlagen der Gebäudeökobilanz für die Windheizungskonzepte geflossen sind (vergleiche hierzu Kapitel 4). Die methodischen Grundlagen werden nachfolgend kurz erläutert. Detaillierte Ergebnisse zur Ökobilanz anhand verschiedener Konzepte und Beispielgebäude können den Ergebnissen der Parameterstudie (vergleiche Kapitel 6.4) entnommen werden.

3.2.2 Technische Systembeschreibung

Für die Validierung der Ergebnisse des Planungstools in Bezug auf ökologische Aspekte wurden spezifische Kombinationen aus Beispielgebäuden (mit unterschiedlichen Bauteilflächen, Energiebedarfswerten und konditionierter Bezugsfläche) und unterschiedlichen Windheizung 2.0-Konzepten genutzt.

Folgende Gebäude werden hierbei unterschieden:

- Demonstrationsgebäude: Zwillingshaus (ZH) und Haus Leitershofen (LH) - jeweils in Neubau und Sanierung
- IWU-Gebäude [20]: Reihenhaus RH J, Einfamilienhaus EFH G und EFH J – jeweils in Neubau und Sanierung

Folgende Windheizung 2.0-Konzepte der ökologischen Analyse werden hierbei differenziert:

- Konzept 0: GEG-Referenz
- Konzept 1: Windheizung 2.0-Konzept mit Wasserbasiertem Wärmespeicher (WWS)
- Konzept 2: Windheizung 2.0-Konzept mit Hochtemperatur-Steinspeicher (HTSS)
- Konzept 3: Windheizung 2.0-Konzept mit Bauteilaktivierung (BTA)

Alle Konzepte werden mit dem „normalen“ Windstromsignal nach Abschnitt 5.7 und einer Hausanschlussleistung von 50 KW bilanziert.

Eine detaillierte Übersicht der jeweiligen Gebäudecharakteristik, der Eingangsdaten für den Gebäudebetrieb, der verwendeten Komponenten sowie die Kombination verschiedener einzelner Technologien zur Gebäudeenergieversorgung in Bezug auf Wärme und Lüftung können Anhang A.5 entnommen werden.

3.2.3 Funktion und funktionelle Einheit

Für die Analyse von Umweltpotenzialen im Rahmen der Ökobilanz wird eine Bezugsgröße für die Ergebnisdarstellung, die sogenannte funktionelle Einheit, zu Grunde gelegt. Die funktionelle Einheit repräsentiert eine quantifizierbare Größe zur Abbildung der Funktion der untersuchten Konzepte.

Die Funktion des Konzepts der Windheizung 2.0 wird für die vorliegenden Untersuchungen definiert als die Versorgung eines Gebäudes mit Wärme mit Hilfe der innovativen Windheizung 2.0-Technologien, und damit die Bereitstellung eines notwendigen thermischen Innenraumkomforts über einen Zeitraum von 25 Jahren. Das Konzept der Windheizung 2.0 befähigt zusätzlich Strom aus Windkraftspitzen in Form von Wärme zwischen zu speichern und für die Wärmeversorgung im Gebäude nutzbar zu machen.

Als funktionelle Einheit (quantifizierbare Größe zur Beschreibung der Funktion bzw. Bezugsgröße für die Ergebnisse der Ökobilanz im Gebäudekontext) wird abweichend von den Festlegungen im Rahmen der Nachhaltigkeitszertifizierung [16] 1 m² konditionierte Bezugsfläche je einem Jahr des Betrachtungszeitraums (1 m² * 1 a) festgelegt.

3.2.4 Definition der Systemgrenzen

Die ökologische Bewertung der Windheizung 2.0-Konzepte im Gebäudekontext entlang ihres Lebenszyklus (Bild 134) richtet sich nach den Lebenszyklusmodulen gemäß DIN EN 15804 [14] und DIN EN 15978 [15]. Es werden die folgenden Lebenszyklusmodule berücksichtigt:

- Herstellung (Modul A1-A3),
- Ersatz und Austausch (Modul B4)
- Abfallbehandlung für Wiederverwendung, Rückgewinnung und Recycling (Modul C3)
- Entsorgung (Modul C4) und
- Vorteile und Belastungen aus Wiederverwendungs-, Rückgewinnungs-, und/oder Recyclingpotenzialen (Modul D).

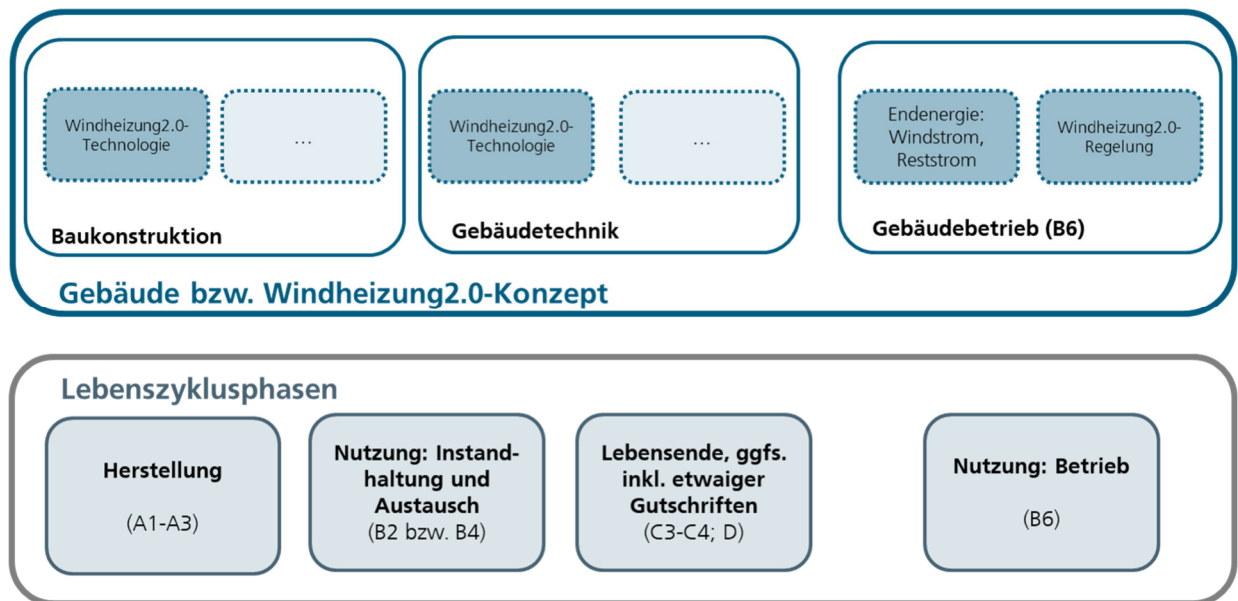


Bild 134:
Systemgrenzen Ökobilanz: nach Gebäudeelementen und Lebenszyklusphasen [Eigene Darstellung].

Als Betrachtungszeitraum der Ökobilanz wird abweichend von Standard-Vorgaben der Nachhaltigkeitszertifizierung in Deutschland [16] ein projektspezifischer Betrachtungszeitraum von 25 Jahren gewählt. Dieser Zeitraum entspricht der gemäß Herstellerangaben geforderten Mindestlebensdauer bzw. Zielgröße für die Lebensdauer der neu entwickelten innovativen Windheizung 2.0-Komponenten.

DELTA-Betrachtung Ökobilanz: Zunächst werden für die Referenz (GEG) und die verschiedenen Varianten der Windheizung 2.0-Konzepte nur die für die Gebäudekonstruktion (dunkelblauer Balken) und den Gebäudebetrieb (lila Balken) variierenden Elemente im Gebäudekontext bilanziert (schematische Darstellung gemäß Bild 135). Durch anschließende Differenzbildung der so ermittelten Ergebnisse der Ökobilanz aus Referenz (GEG) und des jeweiligen Windheizung 2.0-Konzeptes werden die zusätzlichen (Mehrbedarf bzw. Mehraufwand) oder vermiedenen (Minderbedarf bzw. Minderaufwand) potenziellen Umweltwirkungen für das jeweilige Windheizung 2.0-Konzept ermittelt. Die Gebäudekonstruktion bezieht alle relevanten Bauteile der Kostengruppe KG300 gemäß DIN276 [21] (Bodenplatte, Außenwände, Innenwände, Decken, Dach) sowie die Kostengruppe KG400 Anlagentechnik (Technische Gebäudeausrüstung, TGA) mit ein. Für den Gebäudebetrieb werden im Falle der GEG-Referenz im Wesentlichen die Wärmeversorgung mit einem Gasbrennwertgerät sowie Netzstrom berücksichtigt. Im Falle der Windheizung 2.0-Konzepte werden sowohl die Anteile für die Überschussstromnutzung (je nach erzieltm Deckungsgrad) als auch ein potenziell verbleibender Reststrom bilanziert.

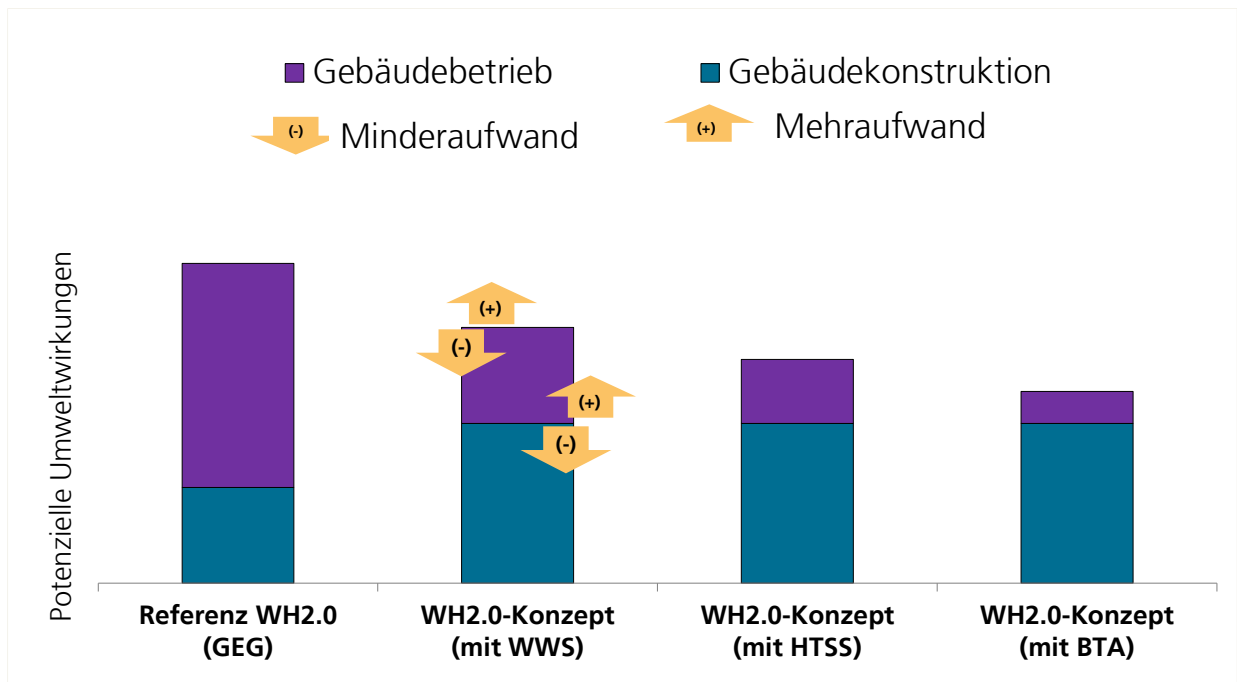


Bild 135:

Systemgrenzen Ökobilanz für die DELTA-Betrachtung. Die Pfeile symbolisieren den Mehr- bzw. Minderaufwand der gestapelten Balken und damit die Bildung der DELTAs [Eigene Darstellung].

3.2.5 Abschätzungen und Annahmen

Ersatz und Austausch von Komponenten (Modul B4): Neben den bereits für die Windheizung 2.0-Komponenten definierten Ansätzen für Ersatz und Austausch (Modul B4, vergleiche Kapitel 3.1) werden im Rahmen der Ökobilanz im Gebäudekontext bei einem Betrachtungszeitraum von 25 Jahren keine Komponenten für Ersatz/Austausch fällig.

Szenarien für das Lebensende (Modul C): In Konsistenz zu den Vorgaben bezüglich der Windheizung 2.0-Komponenten (vergleiche Kapitel 3.1) und in Anlehnung an Vorgaben zur Ökobilanz gängiger Zertifizierungssysteme für die Nachhaltigkeit von Gebäuden [16] werden für das Lebensende materialgruppenspezifische Ansätze genutzt:

- Mineralische Materialien: Stoffliche Verwertung und/oder Entsorgung (Inertstoffdeponie)
- Metalle: Stoffliche Verwertung/Recycling
- Materialien mit Heizwert: Thermische Verwertung
- Alle sonstigen Materialien: Entsorgung (Inertstoffdeponie)

In der Regel sind diese materialgruppenspezifischen Ansätze sowie hiermit verbundenen etwaige Gutschriften in den verwendeten Ökobilanzdaten der ÖKOBAUDAT enthalten.

Umgang mit Gutschriften am Lebensende (Modul D): Im Falle von thermischer Verwertung von Materialien werden sogenannten Gutschriften für die Vermeidung des Einsatzes von primären Energieträgern angesetzt. Im Falle stofflicher Verwertung von Materialien werden Gutschriften für den vermiedenen Einsatz primärer Rohstoffe berücksichtigt. Für die Ermittlung der Höhe der jeweiligen Gutschriften werden Verlusten am Lebensende berücksichtigt, um diese nicht zu überschätzen.

Bauteilflächen für Innenwände und Decken: Für die Demonstrationsgebäude Zwillingshaus (ZH) und Haus Leitershofen (LH) liegen Planunterlagen vor, die spezifische Innenwand- und Deckenflächen konkret bestimmen lassen. Für die gemäß IWU-Typologie definierten Gebäude RH J, EFH G und EFH H sind nur die Bauteile der thermischen Gebäudehülle bekannt. Anhand der Demonstrationsgebäude wird daher ein Verteilungsschlüssel Innenwandfläche bzw. Deckenfläche zu konditionierter Bezugsfläche ermittelt und zur Abschätzung von Innenwand- und Deckenflächen für die IWU-Gebäude angesetzt.

Umgang mit Materialien für die Gebäudekonstruktion (KG300 und KG 400 gemäß DIN 276 [21]): Für die Bilanzierung eines konstruktiv notwendigen Mehr- oder Minderbedarfs zur GEG-Referenz wurden ausgewählte Bauteile der Baukonstruktion und ausgewählte Bauteile der technischen Gebäudeausrüstung berücksichtigt. Für diese wurden geeignete Datensätze der ÖKOBAUDAT [19] identifiziert und im Rahmen der Bilanzierung im Windheizung 2.0-Planungstools mit eingebunden. Im Wesentlichen betrifft dies die folgenden Bauteile und Bauprodukte (vergleiche hierzu auch Anhang A.5):

- KG320 – Bodenplatte: Dämmstoffe, zur Abbildung eines energetisch verbesserten Windheizung 2.0-Gebäudes
- KG330 – Außenwände: Dämmstoffe und Fenster, zur Abbildung eines energetisch verbesserten Windheizung 2.0-Gebäudes
- KG340 – Innenwände: Bauteilaktivierung, über die innovativen Windheizung 2.0-BTA-Komponenten
- KG350 – Decken: Bauteilaktivierung, über die innovativen Windheizung 2.0-BTA-Komponenten
- KG360 – Dach: Dämmstoffe, zur Abbildung eines energetisch verbesserten Windheizung 2.0-Gebäudes
- KG420 – Wärmebereitstellung: Erzeugertechnologien (inkl. HTSS und WWS) und Übergabe, zur Abbildung von Unterschieden in der Wärmebereitstellung
- KG430 – Lüftung: Erzeugertechnologien und Übergabe, zur Abbildung von Unterschieden in den raumlufttechnischen Angaben.

Sicherheitsaufschläge: Sicherheitsaufschläge sind in der vorliegenden Analyse bei Anwendung eines vereinfachten Bilanzierungsverfahrens nicht berücksichtigt. Sie führen bei konservativer Anwendung zu erhöhten absoluten und potenziellen Umweltwirkungen für die Gebäudekonstruktion sowie die Lebenszyklusmodule Herstellung (A1-A3), Austausch/Ersatz (B4) und Lebensende (C3-C4).

3.2.6 Umgang mit dem Gebäudebetrieb

Gebäudebetrieb: Zur Abbildung des Energiebedarfs im Betrieb (Modul B6) liegen Ergebnisse gemäß Vorgaben des GEG [22] und damit gemäß den Vorgaben der DIN V 18599 [10] zu Grunde. Da seitens des Windheizung 2.0-Planungstools Informationen des Beiblatt 3 gemäß DIN V 18599 genutzt werden, wird für das jeweilige Referenzgebäude nur der Primärenergiebedarf als Eingangsgröße für die Ökobilanz übergeben. Um valide Eingangsgrößen bezüglich des Endenergiebedarfs für die Strom- und Wärmenutzung (Gas) für das jeweilige Referenzgebäude erzeugen zu können, wird ein Verteilungsschlüssel abgeleitet. Dieser Verteilungsschlüssel basiert auf Auswertungen für die beiden Demonstrationsgebäude Zwillingshaus (ZH) und Haus Leitershofen (LH). Es ergibt sich ein pauschaler Verteilungsfaktor zwischen Strom und Wärmenutzung von 8 Prozent zu 92 Prozent. Mit Hilfe dieser Faktoren wird zunächst der Primärenergiebedarf des jeweiligen Referenzgebäudes auf die Strom- und Wärmenutzung verteilt. Anschließend wird mit Hilfe der Primärenergiefaktoren (Gas mit 1,1 und Strom mit 1,8) ein Endenergiebedarf für Strom und Wärme für das jeweilige Referenzgebäude ermittelt. Diese beiden Werte bilden die Eingangsdaten für die Bilanzierung des Referenzgebäudes im Gebäudebetrieb (Modul B6). Für die Windheizung 2.0-Konzepte werden die jeweils im Planungstool ermittelten Werte für den Überschussstrom und den verbleibenden Reststrom (Netzstrom) für die Bilanzierung im Gebäudebetrieb angesetzt.

Strom-Mix-Szenario: Zur Berücksichtigung zukünftiger Transformationen im Bereich der Energiebereitstellung (Strom) in Deutschland wurden die BMWi Langfristszenarien [23] von 2017 als relevante Datengrundlagen identifiziert. Als konkretes Langfristszenario wurde das „BMW-Basisszenario“ ausgewählt und dessen Randbedingungen als Berechnungsgrundlage zur Abbildung der zukünftigen Bereitstellung von elektrischer Energie verwendet. Die Annahmen zur Modellbildung können Anhang A.4 entnommen werden.

Neben dem BMW-Basisszenario wurde im Projekt ebenfalls die Verwendung eines Szenarios „ÖKOBAUDAT“ [19] erprobt. Hierzu wurden für die Stützstellen Jahr 2020, 2030, 2040 und 2050 die im Rahmen der ÖKOBAUDAT verfügbaren Datensätze zur Strombereitstellung genutzt. Zwischen den Stützstellen wird linear interpoliert.

Für die Bilanzierung des Strombezuges zu Zeiten von Starkwindereignissen (Überschussstrom) werden Umweltinformationen genutzt, die zu 100 Prozent Strom aus Windkraft abbilden.

Sowohl die zeitlichen Verläufe des Reststrombezugs (Netzstrombezugs) auf Basis des BMW-Basisszenarios als auch auf Basis des ÖKOBAUDAT-Szenarios können Anhang A.4 entnommen werden (Bild 285 und Bild 286). Ebenfalls dokumentiert ist der Ansatz für Strom aus Windkraft.

3.2.7 Einschätzung zur Datenqualität

Anforderungen an die Datenqualität sollen im Rahmen der Ökobilanz u. a. für folgende Parameter dokumentiert werden [14]:

- Zeitbezogene, geografische und technologische Repräsentativität
- Art der Datenaufnahme (gemessen, geschätzt, berechnet)
- Genauigkeit der genutzten Daten (Präzision und Richtigkeit)
- Vollständigkeit der genutzten Daten (z. B. Anteil Primärdaten)

Ziel ist hierbei die Sicherstellung von Repräsentativität, Konsistenz und Nachvollziehbarkeit der verwendeten Daten.

Massen- und Energieströme der zu analysierenden Windheizung 2.0-Konzepte sind auf Basis der technischen Systembeschreibungen aus Sekundärliteratur erfasst. Die erhobenen und genutzten Daten sind zeitlich repräsentativ für die Jahre 2018 bis 2021 sowie geografisch repräsentativ für Deutschland. Für die Ableitung der Strom-Mix Szenarien (BMWi-Basiszenario, ÖKOBAUDAT-Szenario) wurde interpoliert, um Umweltinformationen bis zum Jahr 2050 nutzen zu können. Die Qualität der verwendeten Daten kann als gut eingeschätzt werden.

3.2.8 Systemraumerweiterung und Allokation

Im Hintergrundsystem enthaltene Systemraumerweiterungen und Allokationen für die verwendeten Datensätze und Produkt-EPDs sind den Dokumentationen der Datenbank ÖKOBAUDAT [19] zu entnehmen.

Im Vordergrundsystem wurden keine Allokationen vorgenommen. Systemraumerweiterungen werden unter Berücksichtigung des Lebenszyklusmoduls D gemäß DIN EN 15978 [15] angewendet. Sie beziehen sich auf die Substitution von Primärmaterialien im Rahmen der stofflichen Verwertung sowie von primären Energieträgern im Rahmen der thermischen Verwertung.

3.2.9 Sachbilanz und Modellbildung

Für die Durchführung der Ökobilanz wird das neu entwickelte Planungstool (vergleiche Kapitel 4) genutzt. Die Ökobilanz-Funktionalität des Planungstools wurde vorab der Implementierung in Form eines Eingabe-/Ausgabemodells in Excel programmiert. Die hierfür notwendigen Ökobilanzdaten und methodische Grundlagen der DELTA-Betrachtung wurden hierzu in das Excel integriert. Die Eingabe ist flexibel und angepasst möglich und berücksichtigt die jeweiligen Randbedingungen des analysierten Windheizung 2.0-Konzeptes sowie des jeweils zu Grunde liegenden Gebäudes.

Als Datengrundlage für die Ökobilanz der Bauprodukte wird auf die ÖKOBAU-DAT [19] zurückgegriffen. Des Weiteren werden die Ökobilanzinformationen zu den innovativen Windheizung 2.0-Technologien – als projektspezifische Informationen – integriert.

Die spezifische Dokumentation der Gebäudecharakteristiken für die Beispielgebäude, Bauteilflächen sowie Annahmen zu den Windheizung 2.0-Konzepten etc. können Anhang A.5 entnommen werden.

3.2.10 Wirkungsabschätzung

Für die Wirkungsabschätzung werden international akzeptierte Umweltindikatoren und Wirkungskategorien verwendet, die u. a. auch im Rahmen der Umweltproduktdeklaration Anwendung finden [14]. Ihnen liegen belastbare wissenschaftliche Modelle zur Wirkungsabschätzung zu Grunde. Es werden die Umweltindikatoren und Wirkungskategorien gemäß DIN EN 15804+A1 [14] genutzt.

Für die Studie werden die Ergebnisse der Ökobilanz für die folgenden Wirkungskategorien und Umweltindikatoren mit Relevanz für die untersuchten Windheizung 2.0-Konzepte ausgewiesen:

- Einsatz nicht erneuerbarer Primärenergie, total (PENRT) in [MJ]: als potenzieller Beitrag zur stofflichen und energetischen Nutzung von nicht erneuerbaren primärenergetischen Ressourcen sowie
- Treibhauspotenzial (GWP) in [kg CO₂-Äquivalenten]: als potenzieller Beitrag zum Treibhauseffekt (Klimaerwärmung) beziehungsweise zur globalen Klimaänderung und zum globalen Klimawandel.

3.2.11 Auswertung und Interpretation

Die Ökobilanz der Windheizung 2.0-Konzepte identifiziert den potenziellen Mehr- oder Minderbedarf an Umweltwirkungen im Vergleich zur Betrachtung eines GEG-Referenzgebäudes (DELTA-Betrachtung).

Ökologisch negativ auftretende Umweltwirkungen, die es zu vermeiden gilt, werden aus Sicht der Ökobilanz im mathematischen Sinne als positiver Wert dargestellt. Ökologisch positiv auftretende Umweltwirkungen, die es zu maximieren gilt, werden dagegen im mathematischen Sinne als negativer Wert dargestellt. Zeigen die Ergebnisse der Ökobilanz über den Lebenszyklus eines Windheizung 2.0-Konzeptes einen mathematisch negativen Wert, kann daher auf ökologische Vorteile gegenüber der GEG-Referenz geschlossen werden. Zeigen die Ergebnisse im Gegenzug einen mathematisch positiven Wert, muss von ökologischen Nachteilen durch Nutzung des Windheizung 2.0-Konzeptes im Vergleich zur GEG-Referenz ausgegangen werden.

Nachfolgend werden Ergebnisse der Ökobilanz im Gebäudekontext für ausgewählte „Windheizung 2.0-Konzepte“ am Beispiel des Beitrages zum Treibhauspotenzial (GWP) vorgestellt (siehe auch zusätzliche Dokumentation im Anhang

A.6 und A.7). Die Ergebnisse der Ökobilanz zeigen, dass ähnliche Schlussfolgerungen wie für das GWP auch für den zweiten im Projekt untersuchten ökologischen Indikator Primärenergie, nicht erneuerbar, total (PENRT) ableitbar sind.

Folgende Eigenschaften werden hierbei für alle untersuchten Konzepte zu Grunde gelegt: Lochfassade mit einem Fensteranteil kleiner 30 % und ein normales Windstrom-Signal.

Folgende Abkürzungen für die Darstellung der Ergebnisse finden Verwendung:

- GEG-Referenz: Konzept 0;
- K1-WWS100: Konzept 1 mit Wasserbasiertem Wärmespeicher (WWS), ausgelegt für eine Windstromdeckung von 90 % (Neubau) bzw. 85 % (Sanierung);
- K1-WWS120: Konzept 1 mit Wasserbasiertem Wärmespeicher (WWS), ausgelegt für eine Windstromdeckung von > 90 % (Neubau) bzw. > 85 % (Sanierung);
- K2-HTSS100: Konzept 2 mit Hochtemperatur-Steinspeicher (HTSS), ausgelegt für eine Windstromdeckung von 90 % (Neubau) bzw. 85 % (Sanierung);
- K2-HTSS120: Konzept 2 mit Hochtemperatur-Steinspeicher (HTSS), ausgelegt für eine Windstromdeckung von > 90 % (Neubau) bzw. > 85 % (Sanierung);
- K3-BTA-DE: Konzept 3 mit Bauteilaktivierung (BTA) ausschließlich in den Geschossdecken (DE);
- K3-BTA-DE-WA: Konzept 3 mit Bauteilaktivierung (BTA) in den Geschossdecken (DE) sowie in den Innenwänden (WA).

Haus Leitershofen (LH): Die Ergebnisse der Ökobilanz zeigen in der DELTA-Betrachtung für den Beitrag zum Treibhauspotenzial (GWP) sowohl für den Neubau als auch die Sanierung (Bild 136 bis Bild 139) ökologische Vorteile durch Anwendung der Windheizung 2.0-Konzepte im Vergleich zur GEG-Referenz. Potenzielle Umweltwirkungen aus konstruktivem Mehraufwand der Gebäudekonstruktion können durch deutlich höhere Einsparungen im Gebäudebetrieb kompensiert werden. Eine Auslegung der Konzepte mit erhöhter Windstromdeckung (K1_WWS120, K2_HTSS120, K3_BTA_DE_WA) scheint aus ökologischer Sicht nicht sinnvoll, da keine zusätzlichen und/oder wesentlichen ökologischen Vorteile erzielt werden können. Die Konzepte mit Wasserbasiertem Wärmespeicher (WWS) und Bauteilaktivierung (BTA) zeigen ähnliche ökologische Vorteile. Im Vergleich zum Konzept mit Hochtemperatur-Steinspeicher (HTSS) weisen sie außerdem eine höhere Reduktion der potenziellen Umweltwirkungen über den Lebenszyklus von 25 Jahren auf.

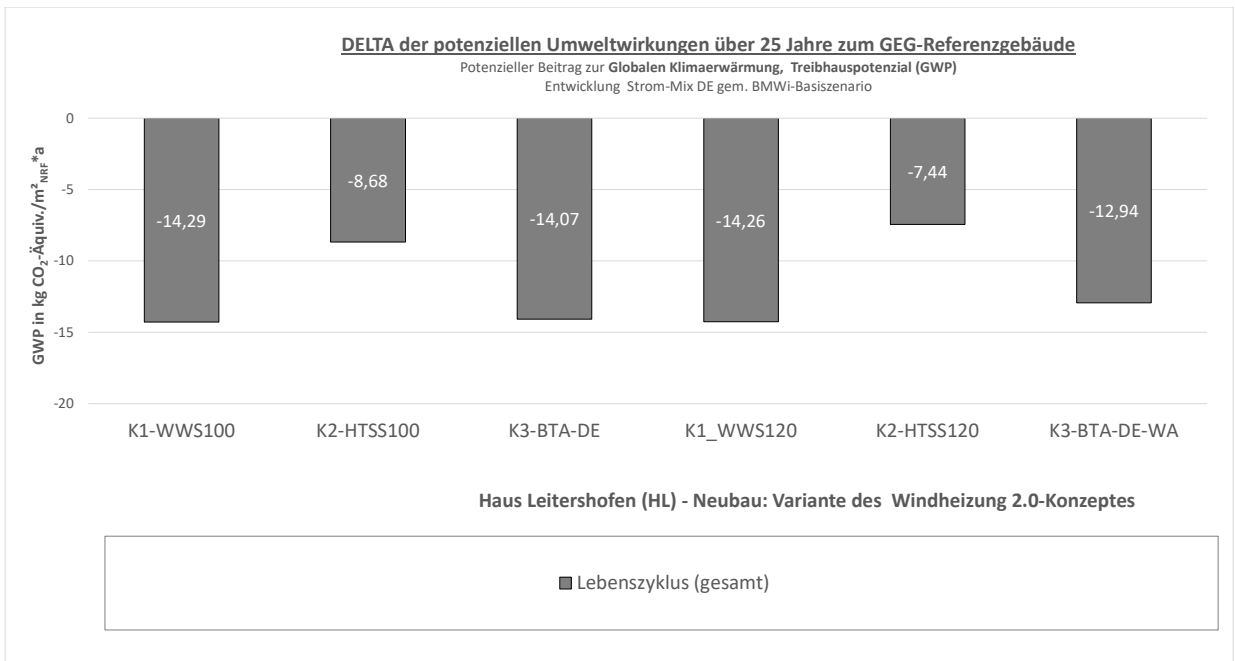


Bild 136:
 Haus Leitershofen (LH), Neubau, DELTA potenzieller Umweltwirkungen (GWP),
 Lebenszyklus.

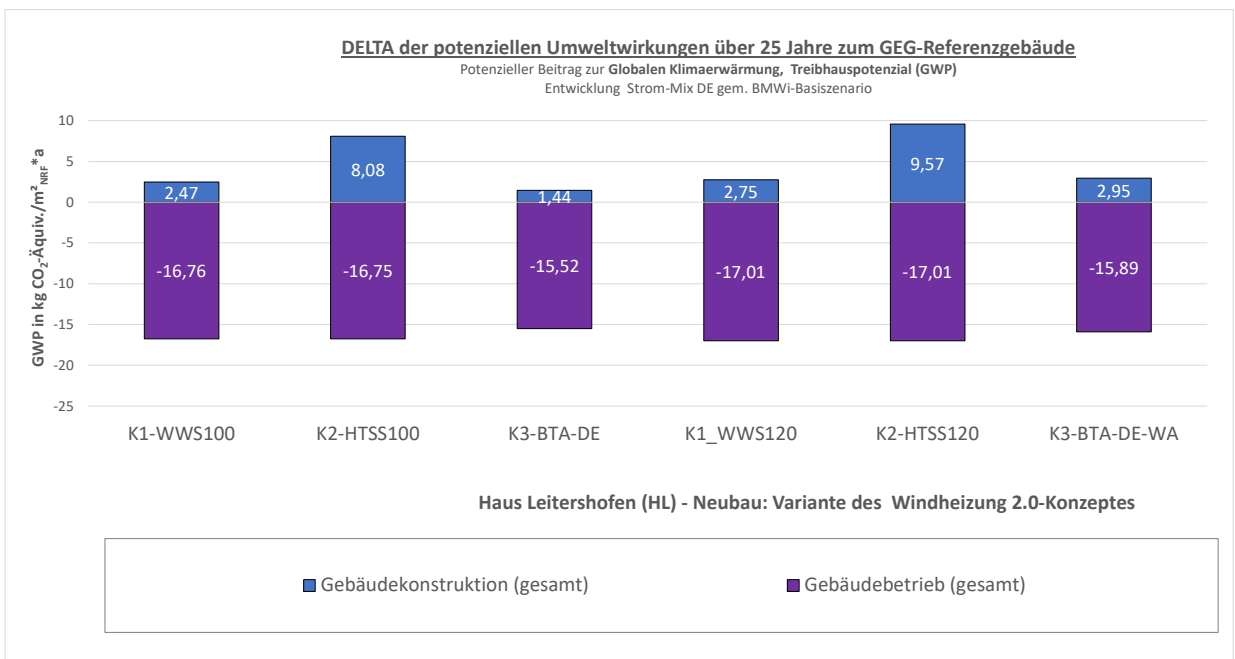


Bild 137:
 Haus Leitershofen (LH), Neubau, DELTA potenzieller Umweltwirkungen (GWP),
 Gebäudekonstruktion und Gebäudebetrieb.

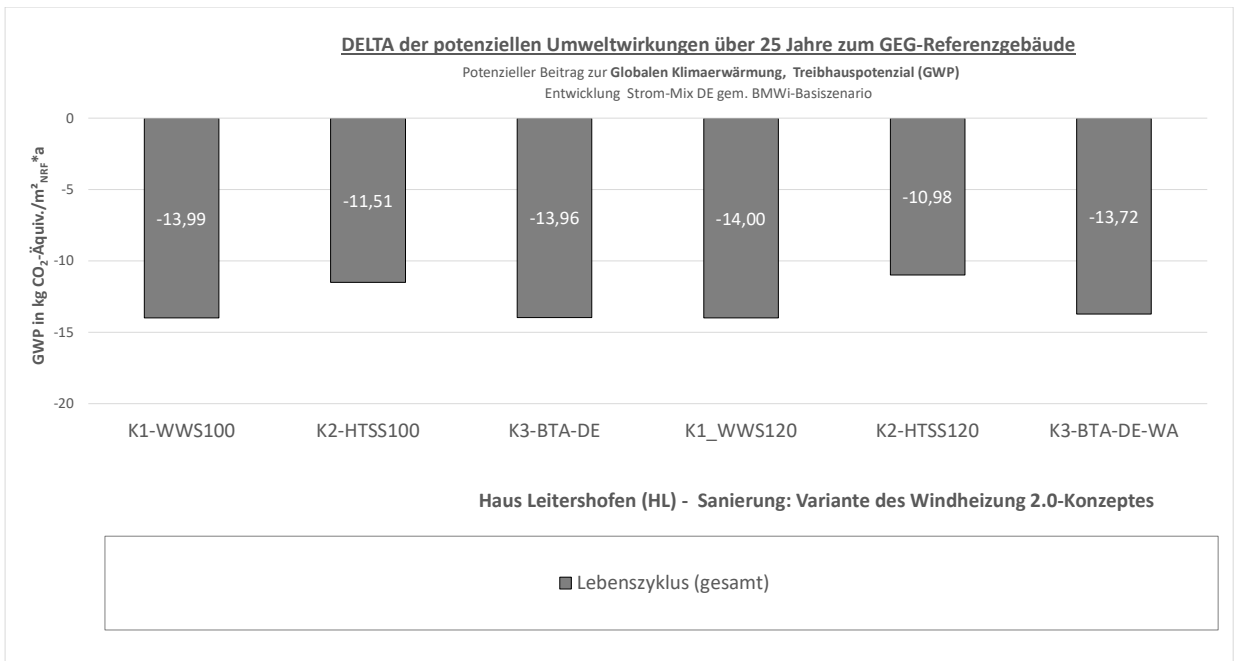


Bild 138:
 Haus Leitershofen (LH), Sanierung, DELTA potenzieller Umweltwirkungen (GWP), Lebenszyklus.

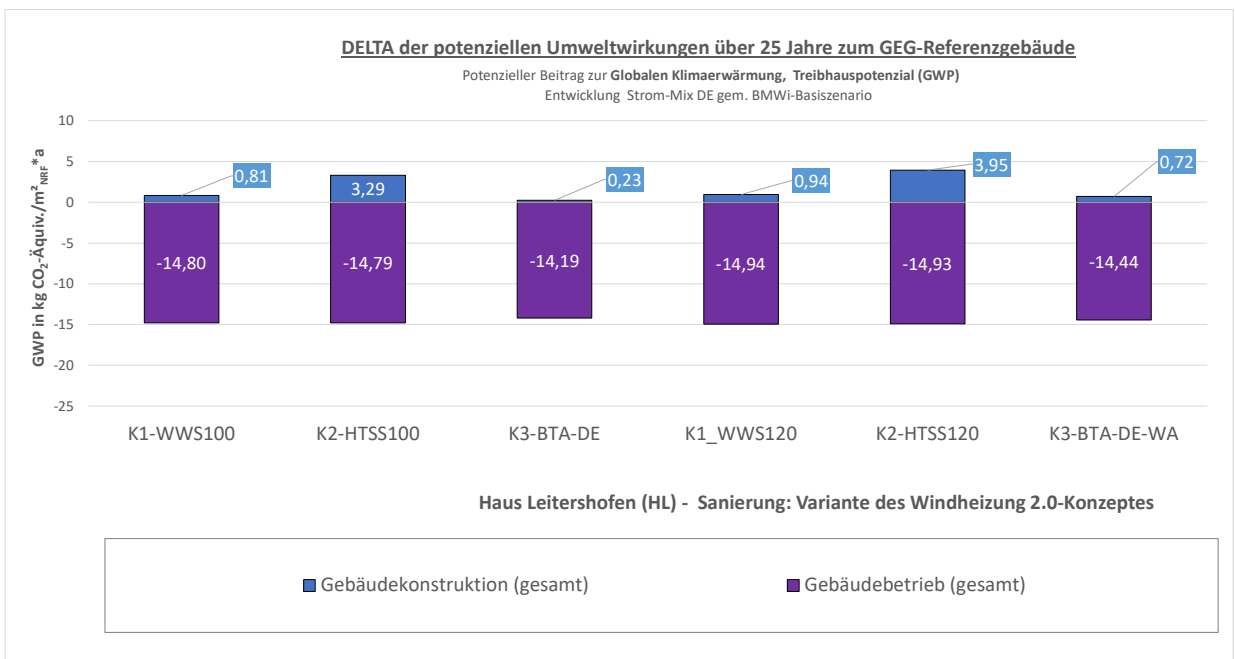


Bild 139:
 Haus Leitershofen (LH), Sanierung, DELTA potenzieller Umweltwirkungen (GWP), Gebäudekonstruktion und Gebäudebetrieb.

Zwillingshaus (ZH): Die Ergebnisse der Ökobilanz zeigen in der DELTA-Betrachtung für den Beitrag zum Treibhauspotenzial (GWP) sowohl für den Neubau als auch die Sanierung (Bild 140 bis Bild 143) ökologische Vorteile durch Anwendung der Windheizung 2.0-Konzepte im Vergleich zur GEG-Referenz. Potenzielle Umweltwirkungen aus konstruktivem Mehraufwand der Gebäudekonstruktion können durch deutlich höhere Einsparungen im Gebäudebetrieb kompensiert werden. Eine Auslegung der Konzepte mit erhöhter Windstromdeckung (K1_WWS120, K2_HTSS120, K3_BTA_DE_WA) scheint aus ökologischer Sicht nicht sinnvoll, da keine zusätzlichen und/oder wesentlichen ökologischen Vorteile erzielt werden können. Alle Konzepte zeigen ähnliche ökologische Vorteile und weisen ähnlich hohe Reduktionspotenziale der Umweltwirkungen über den Lebenszyklus von 25 Jahren auf.

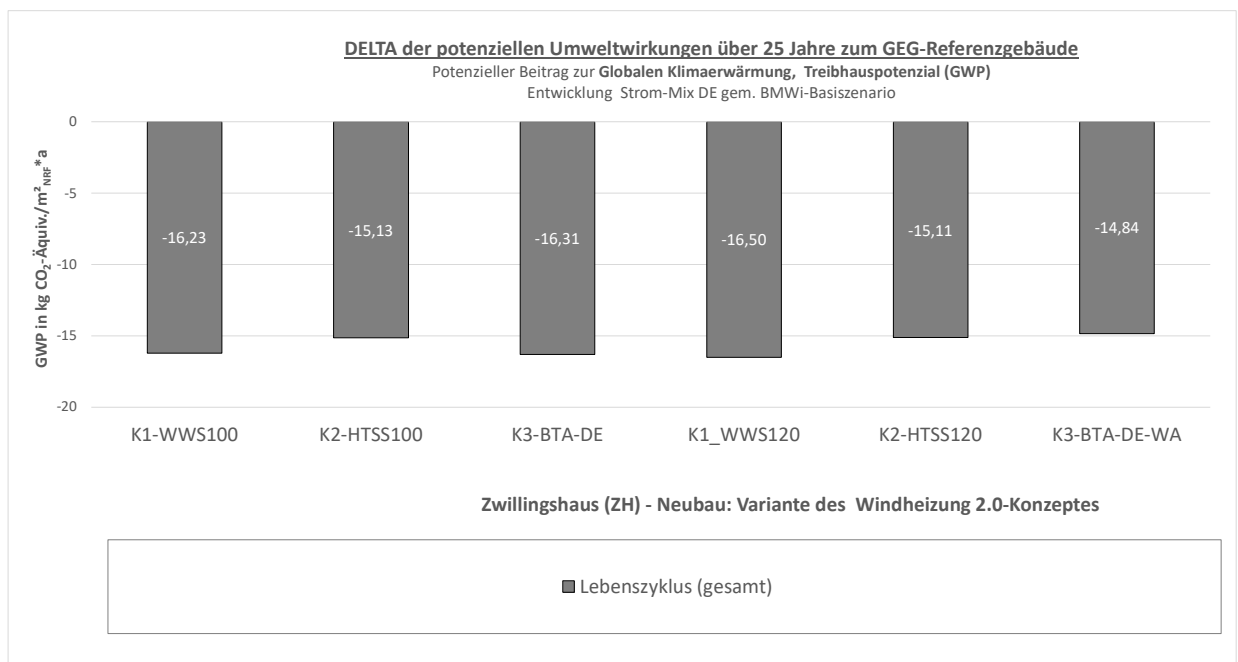


Bild 140:
 Zwillingshaus (ZH), Neubau, DELTA potenzieller Umweltwirkungen (GWP), Lebenszyklus.

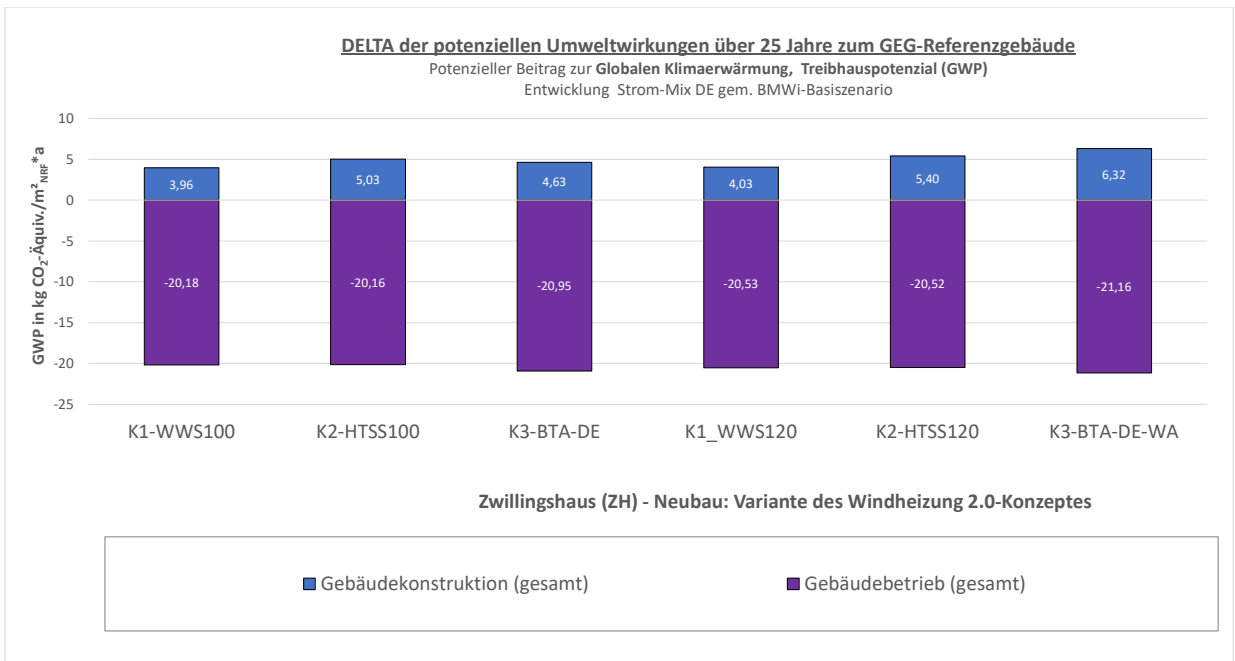


Bild 141:
 Zwillingshaus (ZH), Neubau, DELTA potenzieller Umweltwirkungen (GWP), Gebäudekonstruktion und Gebäudebetrieb.

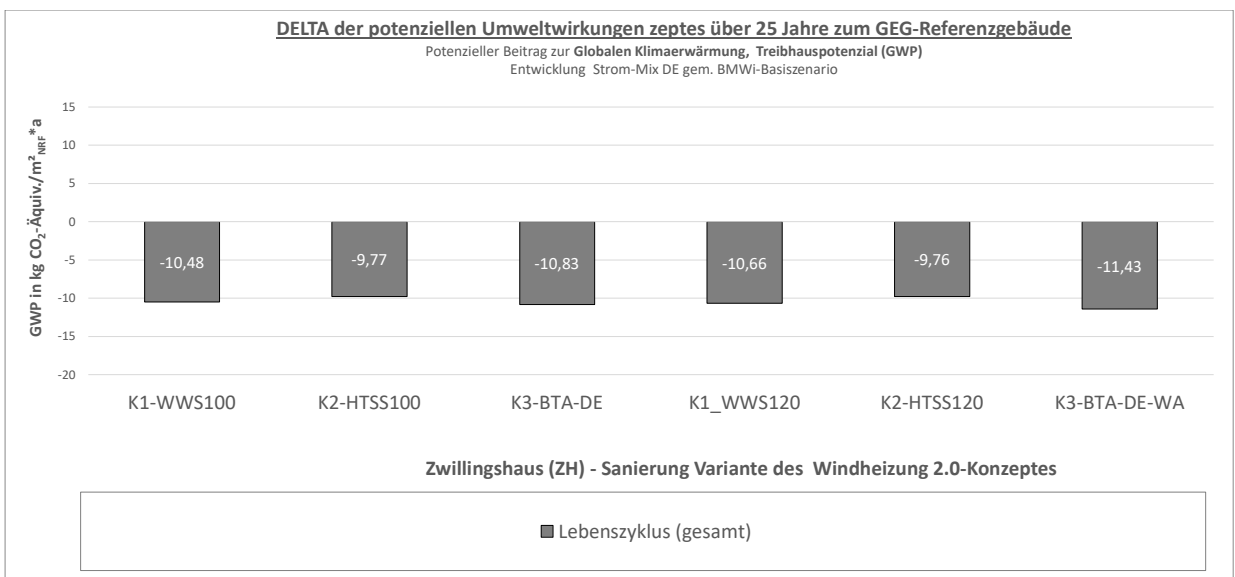


Bild 142:
 Zwillingshaus (ZH), Sanierung, DELTA potenzieller Umweltwirkungen (GWP), Lebenszyklus.

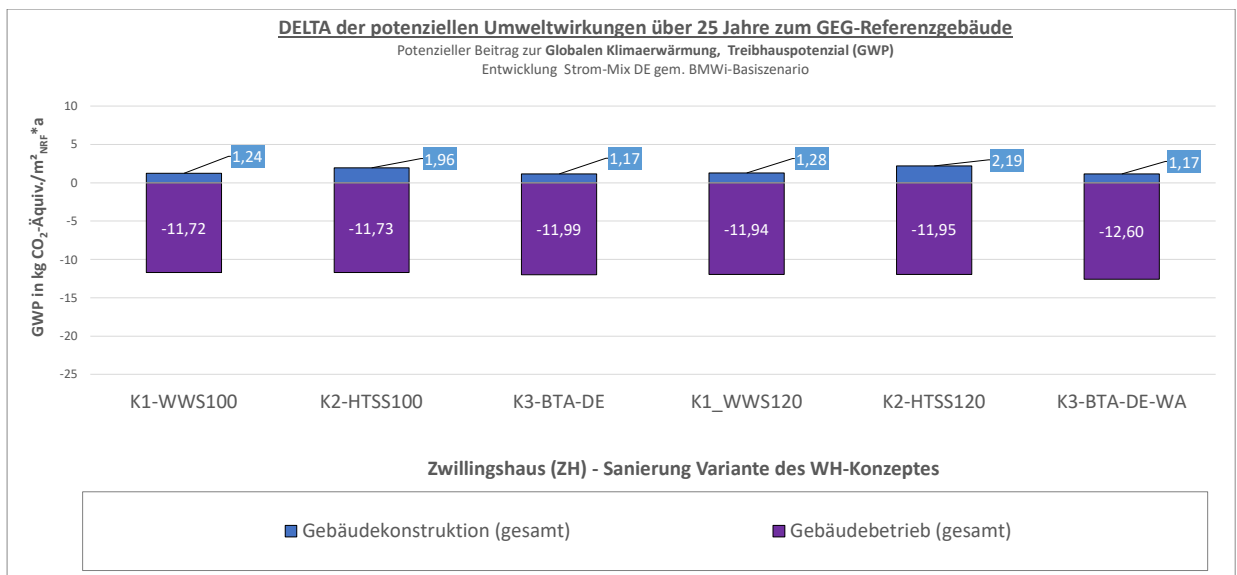


Bild 143:
 Zwillingshaus (ZH), Sanierung, DELTA potenzieller Umweltwirkungen (GWP),
 Gebäudekonstruktion und Gebäudebetrieb.

Reihenhaus J (RHJ): Die Ergebnisse der Ökobilanz zeigen in der DELTA-Betrachtung für den Beitrag zum Treibhauspotenzial (GWP) sowohl für den Neubau als auch die Sanierung (Bild 144 bis Bild 147) ökologische Vorteile durch Anwendung der Windheizung 2.0-Konzepte im Vergleich zur GEG-Referenz. Potenzielle Umweltwirkungen aus konstruktivem Mehraufwand der Gebäudekonstruktion können durch deutlich höhere Einsparungen im Gebäudebetrieb kompensiert werden. Eine Auslegung der Konzepte mit erhöhter Windstromdeckung (K1_WWS120, K2_HTSS120, K3_BTA_DE_WA) scheint aus ökologischer Sicht nicht sinnvoll, da keine zusätzlichen und/oder wesentlichen ökologischen Vorteile erzielt werden können. Alle Konzepte zeigen ähnliche ökologische Vorteile und weisen ähnlich hohe Reduktionspotenziale der Umweltwirkungen über den Lebenszyklus von 25 Jahren auf.

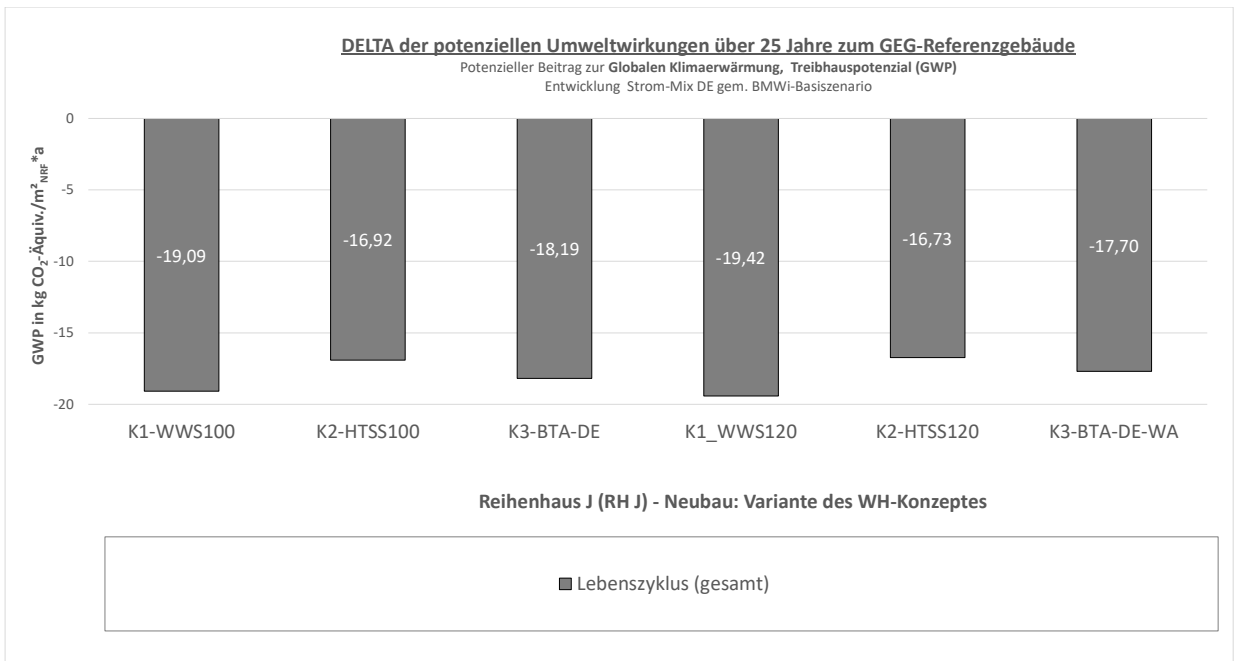


Bild 144:
 Reihenhaus (RH J), Neubau, DELTA potenzieller Umweltwirkungen (GWP), Lebenszyklus.

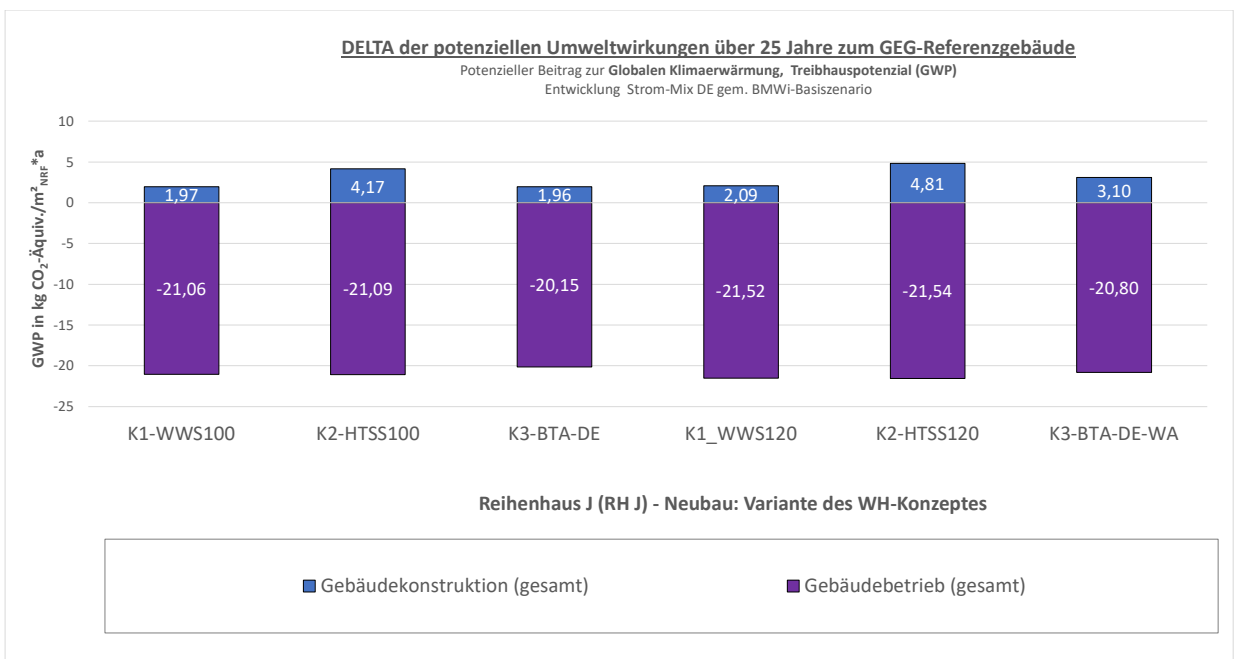


Bild 145:
 Reihenhaus (RH J), Neubau, DELTA potenzieller Umweltwirkungen (GWP), Gebäudekonstruktion und Gebäudebetrieb.

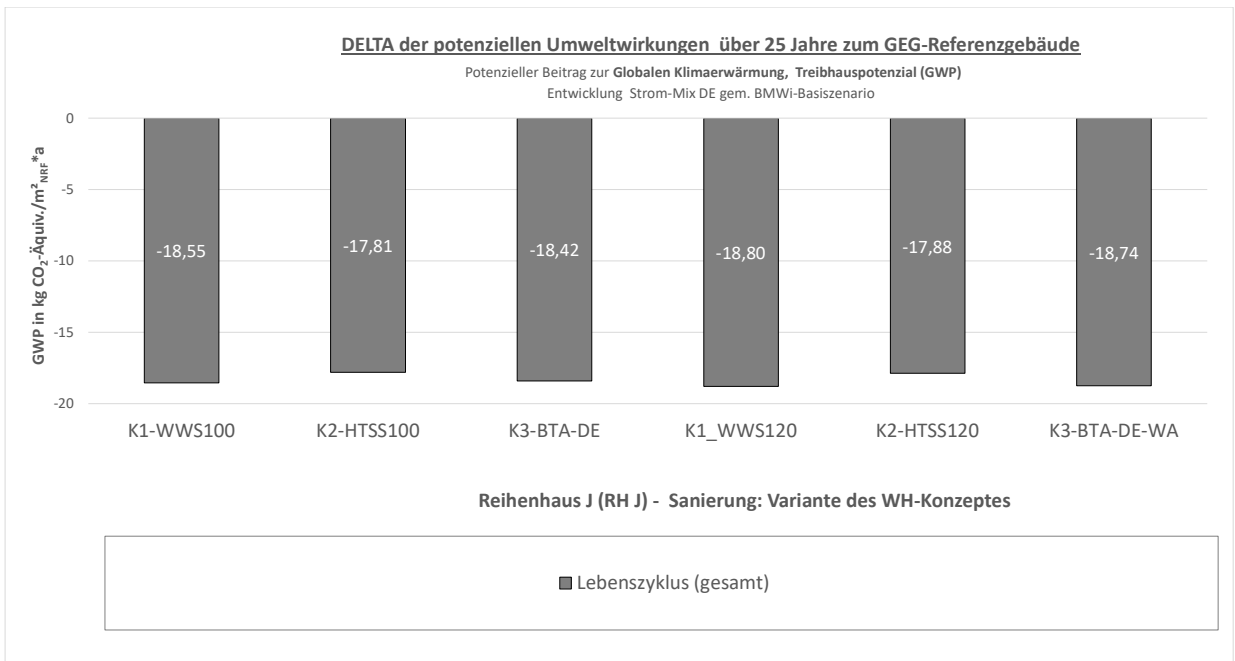


Bild 146:
 Reihenhaus (RH J), Sanierung, DELTA potenzieller Umweltwirkungen (GWP),
 Lebenszyklus.

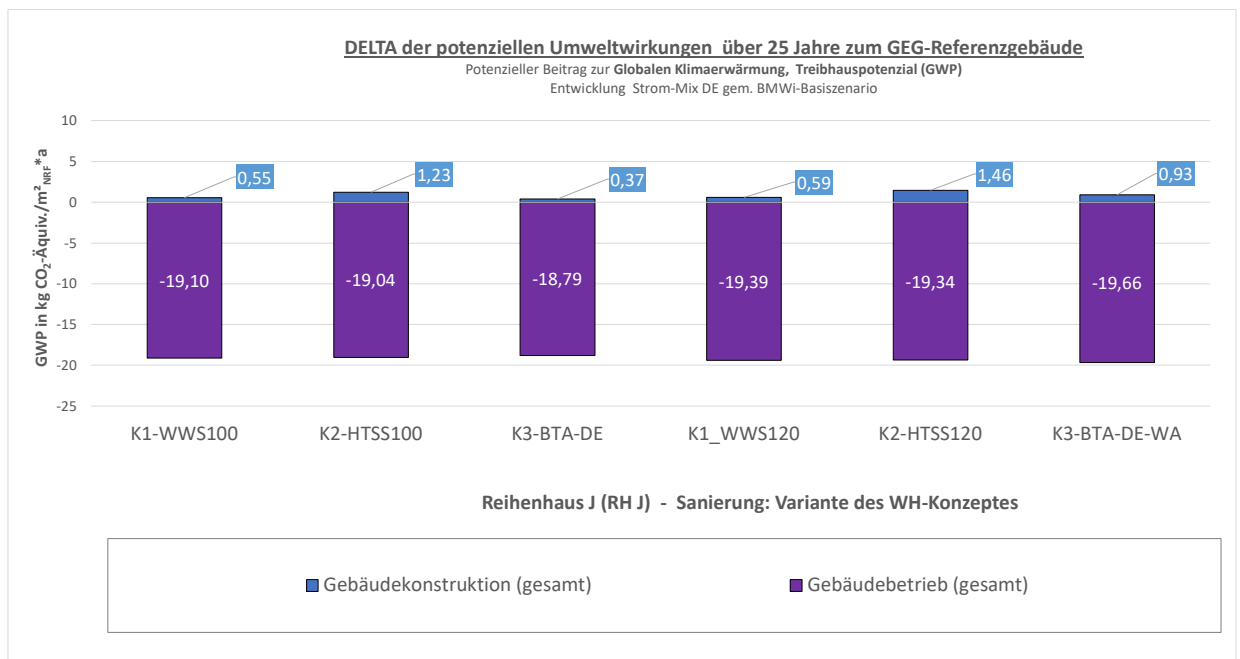


Bild 147:
 Reihenhaus (RH J), Sanierung, DELTA potenzieller Umweltwirkungen (GWP),
 Gebäudekonstruktion und Gebäudebetrieb.

Die Ergebnisse der ökologischen Analyse zeigen zusammenfassend, dass alle analysierten Konzepte anhand der ausgewählten exemplarischen Mustergebäude ökologische Vorteile zur GEG-Referenz aufweisen. Sie zeigen für die Entscheidung zur Wahl eines spezifischen Konzeptes aber auch, dass die Ergebnisse unter Umständen nicht verallgemeinert werden können und gebäudespezifisch analysiert werden sollte. Es stellt sich zukünftig ebenfalls noch die Frage, inwiefern die innovativen Windheizung 2.0-Konzepte auch ökologische Vorteile im Gegensatz zu gängigen Energieversorgungskonzepten (z. B. Wärmepumpenlösung) in hocheffizienten Gebäuden (z. B. Passivhausstandard) aufweisen können und inwiefern sich ein notwendiger konstruktiver Mehraufwand auch hier im Rahmen des Gebäudebetriebes amortisieren lässt.

4 Entwicklung Planungs- und Nachweis-Tool

Die gewonnenen Erkenntnisse über Konzeption, Auslegung und Optimierung der gezeigten Wärmespeicher-Lösungen eines Windheizung 2.0-Gebäudes sollen in die Praxis übertragbar sein und für die individuelle Planung von Gebäuden bereitgestellt werden. Hierzu werden die validierten Konzepte der umfangreichen Simulationsstudie verallgemeinert und damit Randbedingungen und Grenzwerte für unterschiedliche Gebäude und Anwendungsfälle festgelegt. Diese werden in einem Planungstool als Berechnungslogik hinterlegt und können bei der Auslegung für die individuelle Planung von Gebäuden genutzt werden.

Die Entwicklung des Planungs- und Nachweis-Tools gliedert sich im Folgenden in konzeptionelle Vorarbeit (vgl. Abschnitt 4.1 sowie 4.2) sowie softwaretechnische Umsetzung (vgl. Abschnitt 4.3). Der Schwerpunkt bei der Entwicklung des Planungstools lag in der Umsetzung einer Möglichkeit zur Konfiguration und Auslegung der Windheizung 2.0-Konzepte auf Basis eines importierten normbasierten (energetischen) Planungsstandes gemäß DIN TS 18599 Beiblatt 3.

Die Entwicklungsarbeiten teilten sich dabei in eng unter den Partnern abgestimmte, vorbereitende bzw. konkretisierende, konzeptionelle Schritte sowie die eigentlichen darauf aufbauenden technischen Entwicklungsschritte an der Software auf. Durch Rückkopplung der einzelnen Entwicklungsstände mit den Partnern wurden darüber hinaus die parallel bearbeiteten Schritte durch ein die (fachliche) Qualität sicherndes Vorgehen unterlegt.

Das Windheizung 2.0-Planungstool kann unter

<https://ibpupdateservice.eneff06.de/ClickOnce/Windheizung/ToolWindheizung.application>

kostenfrei heruntergeladen werden.

4.1 Konzeptionelle und berechnungstechnische Grundlagen der Werkzeugentwicklung

Damit das Planungs- und Auslegungswerkzeug bestmögliche Anwendung findet, wurde in einem ersten Schritt eine Umfrage unter den Verbundpartnern erstellt, um Zielgruppen und Anwendungsfälle genauer zu bestimmen. Dabei wurden folgende Kategorien abgefragt:

Anwendungsfall 1: Information für die Bauherrschaft

Bauherrschaften werden über die Vorteile eines Windheizung 2.0-Bauvorhabens informiert, so dass diese gezielt nach einer Umsetzung des Windheizungskonzepts bei ihrer Architektin oder ihrem Architekten, bzw. bei ihrer Energieberaterin oder ihrem Energieberater fragen können.

Dies kann durch eine Aufbereitung von Case Studies geschehen.

Als Form ist eine Webseite, die auch als App verfügbar ist, denkbar.

Anwendungsfall 2: Erste Informationen für Architekten und Energieberater

Architekten und Energieberater sollen gezielt informiert werden, damit sie das Konzept Windheizung 2.0 ihren Bauherren als mögliche Option in ihren Bauvorhaben vorschlagen.

Dies kann durch eine Aufbereitung von Case Studies mit klarer Darstellung der Vorteile, aber auch möglicher Hindernisse und Hemmnisse und deren Lösungsmöglichkeiten, erfolgen.

Als Form ist eine Webseite, die auch als App verfügbar ist, denkbar.

Anwendungsfall 3: Vertiefte Informationen für Architekten und Energieberater

Architekten und Energieberater haben bereits vom Konzept Windheizung 2.0 gehört und benötigen weitere (allgemeine) Informationen, um in die Planung einsteigen zu können.

Das kann entweder als Potentialabschätzungstool für ein Beispielgebäude erfolgen, an dem verschiedene signifikante Parameter gegeneinander variiert und eine Bewertung hinsichtlich verschiedener Kriterien (energetische, ökologische oder ökonomische Aspekte) erfolgt oder als eine Ergänzung für ein bestehendes Tool realisiert werden.

Anwendungsfall 4: Planungs- und Nachweis-Tool für den Genehmigungsprozess

Das Planungs- und Nachweis-Tool soll den Architekten und Energieberatern im Genehmigungsprozess und beim Nachweis nach GEG den Nachweis eines Windheizungsgebäudes ermöglichen.

Da hier eine monatliche Bilanzierung durchgeführt wird, können eventuell nicht alle Vor- und Nachteile eines Windheizung 2.0-Bauvorhabens komplett dargestellt werden.

Anwendungsfall 5: Komplettes Planungs- und Nachweis-Tools

Es wird ein Planungstool benötigt, das Architekten / Energieberatern möglichst ohne weitere Hilfe ermöglicht, eine konkrete Planung eines Gebäudes mit Windheizung in allen Aspekten durchzuführen.

Das Tool würde eine oder mehrere Simulationen (energetisch und raumklimatisch) und eine Ökobilanzierung parametrieren und durchführen und die Abschätzung der energetischen, ökologischen und ökonomischen Aspekte darstellen.

Es wurden zu den fünf Kategorien insgesamt 25 Fragen gestellt. Der Fragebogen wurde von 21 Teilnehmer beantwortet, davon waren 10 vollständig ausgefüllt.

Es wurden vorab einige Fragen zur Einschätzung der Bekanntheit des Windheizung 2.0-Konzepts gestellt oder - wie in Bild 148 abgebildet - zur Einschätzung, in welchen Bereichen sich die Vorteile besonders gut darstellen lassen.

„Die Vorteile eines Windheizung 2.0-Bauvorhabens lassen sich meiner Meinung nach in folgenden Bereichen besonders gut darstellen:“

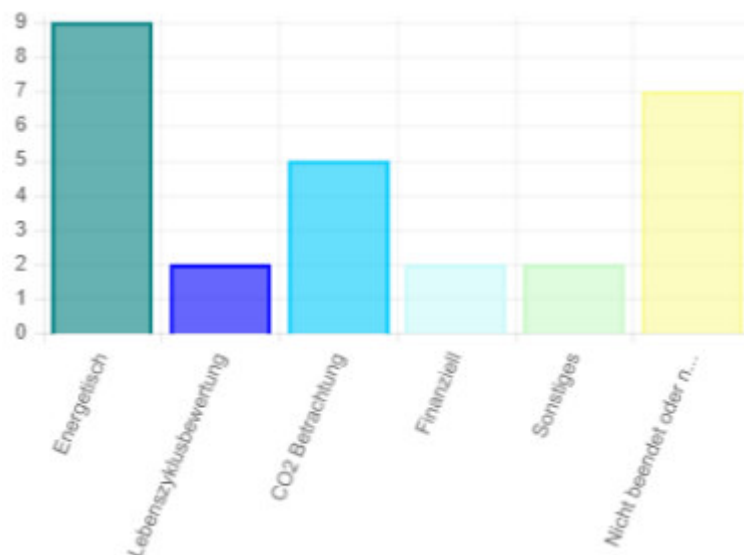


Bild 148:

Umfrageergebnis zur Frage, in welchen Bereichen sich die Vorteile eines Windheizung 2.0-Bauvorhabens besonders gut darstellen lassen.

Anschließend wurden für die fünf Anwendungsfälle verschiedene Fragen gestellt. Abschließend wurde nach einer Einschätzung gefragt, für welchen Anwendungsfall das Tool relevant ist. Bild 149 zeigt, dass der dritte Anwendungsfall „Vertiefte Informationen für Architekten / Energieberater“ gefolgt vom Anwendungsfall 4 „Planungs-/Nachweis-Tool für den Genehmigungsprozess“ als am relevantesten für ein Tool eingestuft wurde.

Nach Beantwortung der vorangegangenen Fragen sehe ich nachfolgende zwei Anwendungsfälle als die relevanten für ein Tool.

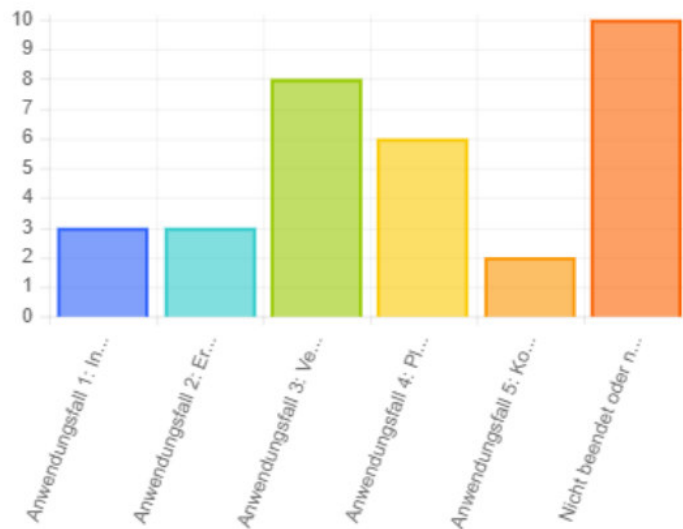


Bild 149:
Umfrageergebnis.

Die Umfrageergebnisse haben zum einen gezeigt, dass das Konzept Windheizung 2.0 bei Energieplanern und Ingenieuren eher als bei den Bauherren bekannt ist und zum anderen, dass das Konzept bereits im Zuge der notwendigen Nachweise des Gebäudeenergiegesetzes (GEG) bewertet werden sollte.

Dazu soll aber kein umfangreiches Bewertungswerkzeug mit erneuter Eingabe aller Eingabedaten erstellt werden, sondern weitestgehend auf bereits im Zuge des Nachweises erfassten Daten aufgebaut werden. Dazu bietet es sich an, dass die Eingabedaten des Bewertungstools sich an der standardisierten Dokumentation einer Energiebedarfsberechnung gemäß Beiblatt 3 zur DIN V 18599 orientieren (Energetische Bewertung von Gebäuden – Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung – Beiblatt 3 (vgl. Bild 150): Überführung der Berechnungsergebnisse einer Energiebilanz nach DIN TS 18599 in ein standardisiertes Ausgabeformat).

Durch die Verwendung eines neutralen, standardisierten Eingabeformats ist lediglich eine Berechnung in einem Bewertungstool nach DIN V 18599 erforderlich, um die entsprechenden Bewertungen nach dem Konzept Windheizung 2.0 im Nachweistool durchführen zu können. Zudem können die Werte durch einen geeigneten Konverter auch händisch in das Austauschformat eingetragen werden und damit auch andere Berechnungsmethoden für die Eingabe in das Bewertungswerkzeug genutzt werden, sofern die notwendigen Bewertungsgrößen gegeben sind.

10.2 Gesamtenergiebilanz auf Gebäudeebene

Tabelle T.10.3.2.1 Gesamtenergiebilanz auf Gebäudeebene

| Energienmengen in kWh/(m ² a) | flächenbezogene Energiekennwerte für thermisch konditionierte... | | | | Aufwands- zahl | Erläuterungen | |
|--|---|----------------|---------------------------------------|----------------|-------------------|---|---|
| | Nettogrundfläche | | Nettogrundfläche mit stat. Heizung | | | | |
| | 200,0 | m ² | 200,0 | m ² | | | |
| Nutzenergiebedarf Heizung (statisch): | | 15,1 | | 15,1 | | Anzahl von Zonen mit statischer Heizung: | 0 |
| Verluste der Wärmeübergabe | + | 1,2 | + | 1,2 | 1,038 | Anzahl der Übergabesysteme: | 2 |
| Verluste der Wärmeverteilung | + | ,7 | + | ,7 | 1,090 | Anzahl der Verteilnetze: | 1 |
| Verluste der Wärmespeicherung | + | 1,3 | + | 1,3 | 1,103 | Anzahl der Speichersysteme: | 1 |
| Erzeugernutzwärmeabgabe | = | 18,3 | = | 18,3 | | | |
| Verluste der Wärmeerzeugung | + | ,0 | + | ,0 | 1,055 | Anzahl der Erzeugungssysteme: | 1 |
| gesamte Endenergie | = | 19,3 | = | 19,3 | | | |
| von außen, zugeführte Endenergie | - | 19,3 | - | 19,3 | ,000 | (Gesamt) | |
| im System genutzte regenerative Endenergie | = | ,0 | = | ,0 | | | |
| aus dem System zurückgeführte regenerative Endenergie | + | ,0 | + | ,0 | | | |
| produzierte regenerative Energie | + | ,0 | = | ,0 | | | |

Bild 150:

Exemplarischer Ausschnitt aus dem standardisierten Ausgabeformat zu Energiebedarfsberechnungen nach DIN TS 18599 Beiblatt 3.

4.1.1 Bestimmung der Auslegungsgrößen der Windheizung 2.0 Konzepte

Berücksichtigte Aspekte der energetischen Bewertung (Zielstellung: Bestimmung Anteil Wind- bzw. Überschussenergie):

- Monatsweise Bilanzierung des (End-)Energiebedarfs des potentiellen Windheizung 2.0-Gebäudes.
- Dabei wird auf Bilanzdaten der normbasierten Berechnung aus der Eingabedatei zurückgegriffen.
- Bestimmung anrechenbare Energiemenge Wind aus (nach-) berechneter Bilanz im Windheizung 2.0-Tool (Windperiodenverfahren, siehe Kapitel 4.2).
- Anrechenbare Menge Überschussenergie wird energetisch (End- und Primärenergie), ökologisch und monetär bewertet.

Bezüglich der Berücksichtigung der Konzepte BTA sowie HTSS als interne Wärmequelle in der Heizwärmebilanz stellt das Piktogramm in Bild 151 die wesentlichen energetischen Größen dar.

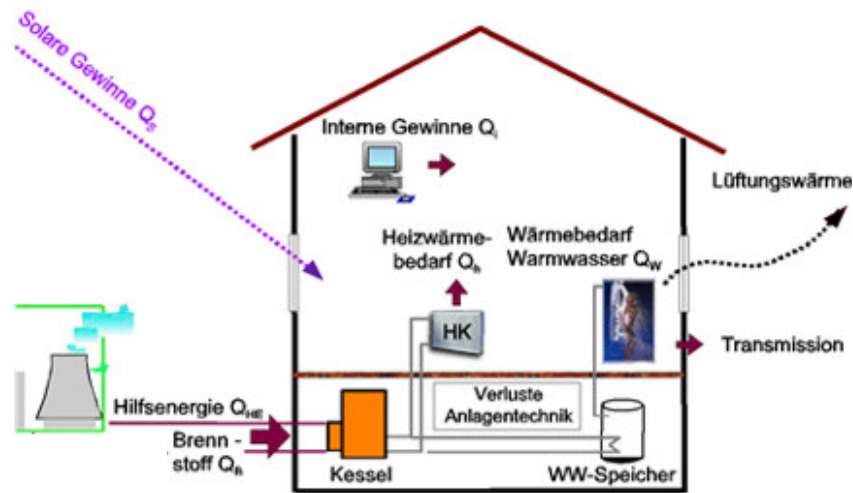


Bild 151:
Piktogramm: Darstellung Energien im Gebäude.

In Bild 152 ist schematisch die normbasiert vorgegebene (iterative) Berechnungsvorschrift dargestellt, in der ein durch die Konfiguration eines Windheizungskonzeptes für ein bestimmtes Gebäude bemessener Speicherverlustwert dann als interne „Wärmequelle“ mit berücksichtigt werden soll.

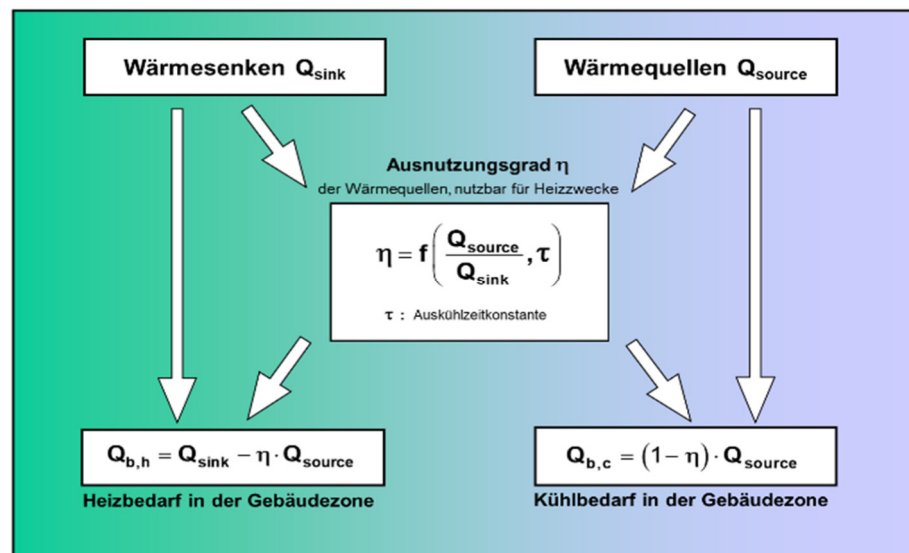


Bild 152:
Schematische Darstellung Ausnutzungsgrad gemäß DIN V 18599.

Die berechnete Bilanz im Windheizung 2.0 Tool soll dem in folgenden Schritten dargestellten Vorgehen zur Bestimmung der anrechenbaren Energiemenge Wind (Überschussstrom) dienen.

- Bestimmung Energiemenge BTA / HTSS aus vorberechneter Variantenmatrix
 - $Q_{h,b,Wind,available}$
- Bilanzierung mit monatlichem Heizwärmebedarf und Nutzungsgrad
- Nutzbare Windheizungs-Heizwärme $Q_{h,b,Wind,used}$
- Restliche DIN V 18599-Heizwärme $Q_{h,b,18599,rest}$
- Heizwärmebedarf:
 - $Q_{h,b,Wind,used}$
 - $Q_{h,b,18599,rest}$
- Umrechnung auf Endenergie mittels Anlagenaufwandszahl
 - $Q_{f,b,Wind,used}$
 - $Q_{f,b,18599,rest}$
- Bestimmung Primärenergie (mittels Faktor $f_{primär}$):
 - $Q_{f,b,Wind,used} = 0$ ($f_{primär} = 0$)
 - $Q_{f,b,18599,rest}$ mit $f_{primär}$ aus dem Ist-Gebäude

4.1.2 Spezifikation des funktionalen Umfangs gemäß den identifizierten Anwendungsfällen

Folgende Punkte konnten zum Funktionsumfang des Werkzeugs aus den Umfrageergebnissen zu möglichen Anwendungsfällen als relevante Hilfestellungen für Planende identifiziert werden:

- Energetische Bewertung Windheizung 2.0 mit der Bestimmung des Anteils an Überschussstrom
 - Standardisierte Eingangsdaten der Bilanzierung nach DIN V 18599 (Beiblatt 3 - normierte Dokumentationsvorgabe)
 - Weitere Dateneingabe zur Dimensionierung der Windheizung 2.0 (z.B. Innenwände)
 - *Ergebnisaufbereitung*
 - Heizwärmebedarf umgerechnet auf Endenergie mit Anlagenaufwandszahl oder ähnlich
 - Bilden von Endenergieanteilen für „Überschuss- bzw. Reststrom“
- Wirkung der Windheizung 2.0-Technologien bewerten
 - Vergleich zur Bewertung nach GEG
 - Grundlage für Berechnung der Wirtschaftlichkeit
 - Berechnung geht in die LCA Bewertung der Betriebsphase ein
- Verschiedene Ausführungen können in Varianten bewertet werden

Diese Gesichtspunkte zur Entwicklung des Auslegungswerkzeuges basieren dabei auf den in der Umfrage erhobenen Randbedingungen:

- Anwendungsfall 3: Vertiefte Informationen für Architekten und Energieberater
- Anwendungsfall 4: Planungs-/Nachweis-Tool für den Genehmigungsprozess

Das zu entwickelnde Werkzeug soll mit minimalem zusätzlichem Eingabeaufwand über die bereits im Zuge des Nachweises erfassten Daten bedienbar sein. Dabei soll das alleinstehend ausführbare Fachwerkzeug mittels der offenenchnittstelle mit Eingangsdaten aus bestehenden GEG Nachweistools bestückt werden können.

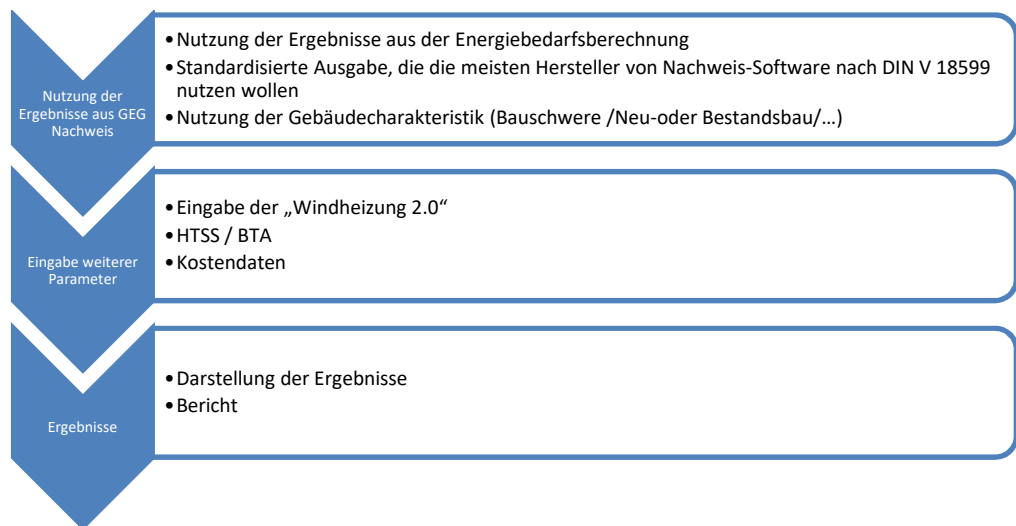


Bild 153:
Konzeptionelle Workflow Auslegung.

Zur Gestaltung der Bedienoberfläche sollen drei Bereiche die Hauptanforderungen – Informieren, Auslegen und Bewerten – abbilden. Auf der Startseite des Werkzeuges soll ein zentrales Bedienelement den Anwendern das Navigieren in den verschiedenen Bereichen ermöglichen. Die Anwendungsbereiche decken dabei die als wichtig identifizierten Aspekte der abgefragten Anwendungsfälle ab. Neben dem ersten zur allgemeinen Information über die Windheizung 2.0-Technologie vorgesehenen Bereich, stellen die beiden anderen die Möglichkeit dar, ein konkretes Projekt auszulegen und zu bewerten. Eine Anzeige der Windheizung 2.0 Bewertung im letzten Bereich soll anhand der im folgenden Workflow skizzierten wesentlichen Schritte durchgeführt werden können:

Eine formale Spezifikation des benötigten Funktionsumfangs bietet neben einer entwicklungstechnischen Grundlage, auch die Basis zur Kommunikation und Abstimmung unter den Partnern. Bild 154 stellt eine Konzeptfassung vom spezifizierten Bedienungsablauf des Tools in einem formalisierten Prozessdiagramm dar. Der dabei avisierte Workflow beginnt mit dem Import eines normbasierten Datensatzes aus der nach DIN V 18599 normierten Energiebilanzierung (vgl. oberste „Swimlane“ in Bild 154). Es existieren verschiedene (bauliche) Randbedingungen zu den einzelnen Konzepten der Windheizung 2.0, die eine Implementierung im Gebäude prinzipiell bestimmen. So kann beispielsweise eine

Bauteilaktivierung nur bei Vorhandensein entsprechender massiver Bauteile realisiert werden. In einer dem Import folgenden Plausibilitätsprüfung, werden daher entsprechende Kriterien, die einer Umsetzung der Windheizung 2.0 entgegenstehen geprüft.

An diese Eignungsprüfung (Plausibilisierung) schließt dann die eigentliche Auslegung der Windheizung 2.0-Konzepte an. Dabei werden je avisiertem Konzept neben gemeinsamen Parametern, wie z.B. der zur Verfügung stehenden elektrischen Anschlussleistung, alle benötigten individuellen Parameter erfasst, die über die bereits im eingelesenen Datensatz der Energiebilanzierung hinausgehen. Für die Bauteilaktivierung wäre das beispielsweise die Angabe von Innenwänden zur Bemäßung einer möglichen Speicherkapazität, da in der Bilanzierung gemäß DIN V 18599 lediglich die Hüllbauteile zur Bestimmung des Transmissionsgrades erfasst werden. Mit dem Angeben der zur Auslegung erforderlichen Parameter werden die dadurch im Hintergrund verbundene Berechnung des Grades der möglichen Deckung des Energiebedarfs durch Überschussstrom anhand eines Windperiodenverfahrens gespeist. Den Planenden kann bei der Konfiguration der Windheizung 2.0 mit der Darstellung eines potentiellen Ausnutzungsgrads des Überschussstroms eine wichtige Entscheidungsgrundlage zur Eignung der Planungsvariante angezeigt werden. Eine begleitende „Nachrechnungen“, zu den aus der Energiebilanz stammenden Eingangsdaten, ermöglicht die Angleichung der ursprünglich ohne Windheizung 2.0-Konzept errechneten Energiebilanzwerte an eine dem konfigurierten Ausbau rechnungstragende Bilanzierung. Somit wird für den letzten Schritt Ergebnisauswertung im Workflow des Tools die Grundlage in der Konfiguration geschaffen.

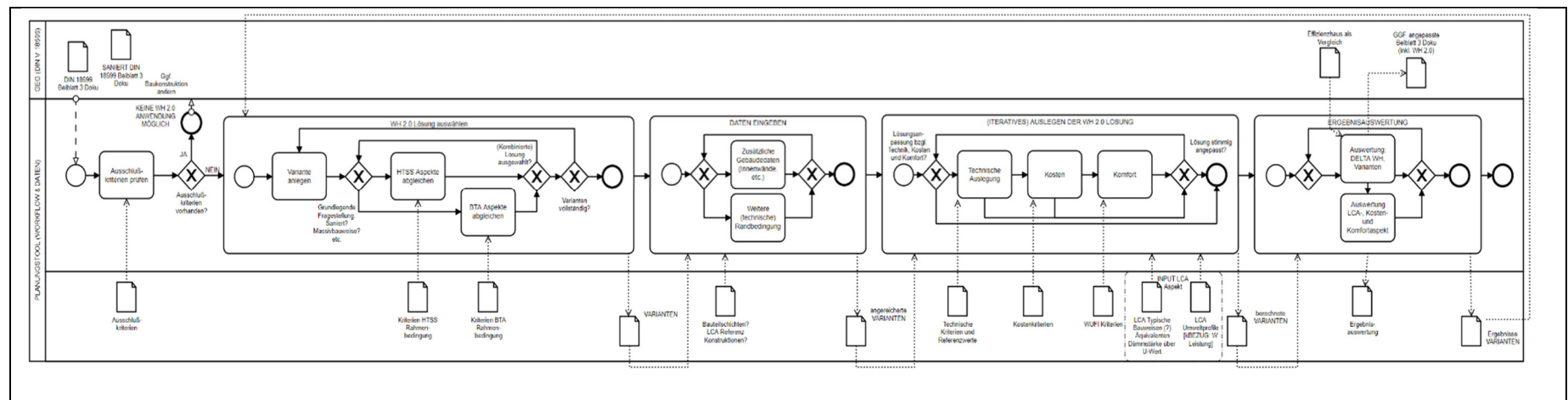


Bild 154:
Prozessdiagramm vom konzipierten Workflow des Tools.

Mit dem Aufzeigen eines Deltawertes zum Referenzgebäude werden den Planenden dabei die Optimierungspotentiale einer Windheizung 2.0-Konzeption anhand einer Gegenüberstellung verdeutlicht. Die Möglichkeit, den Workflow für verschiedene Planungsvarianten auf den gleichen Eingangsdaten aus der normierten Energiebilanz durchzuspielen und zur Wiederverwendung persistieren zu können, ergänzt den Funktionsumfang des Tools mit einem wichtigen Instrument zur planungsbegleitend nachvollziehbaren Entscheidungsunterstützung.

4.1.3 Konzeption und der Benutzeroberfläche

Zu dem im vorherigen Kapitel weiter ausformulierten Workflow des Tools wurden die Benutzeroberflächen entwickelt. Ein zentrales Navigationselement (vgl. Bild 155) ermöglicht den Aufruf der einzelnen Oberflächen. Diese sind in einen informativen Bereich und in einen Bereich zur Auslegung und Ergebnisauswertung aufgeteilt. In einer Steuerleiste auf der linken Seite können die Bedienoberflächen zu den einzelnen Inhalten angesteuert werden.

Durch die weitere Spezifikation der Auslegungsgrößen wurde für die Konfiguration der Windheizung 2.0-Konzepte eine Bedienoberfläche entwickelt. In Bild 156 kann man erkennen wie von der zentralen Navigationsschaltfläche die integrierten Informationen, die Datenbearbeitung und die Ergebnisdarstellung aufgerufen werden können.

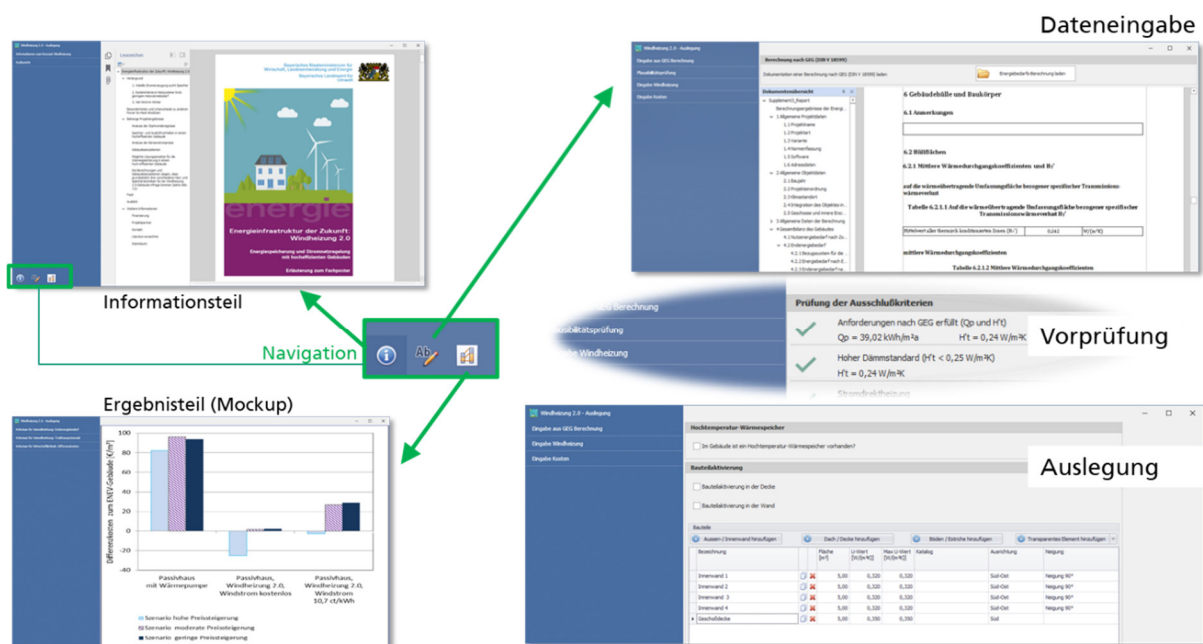


Bild 155: Illustration des zentralen Navigationselements mit Ansichten.

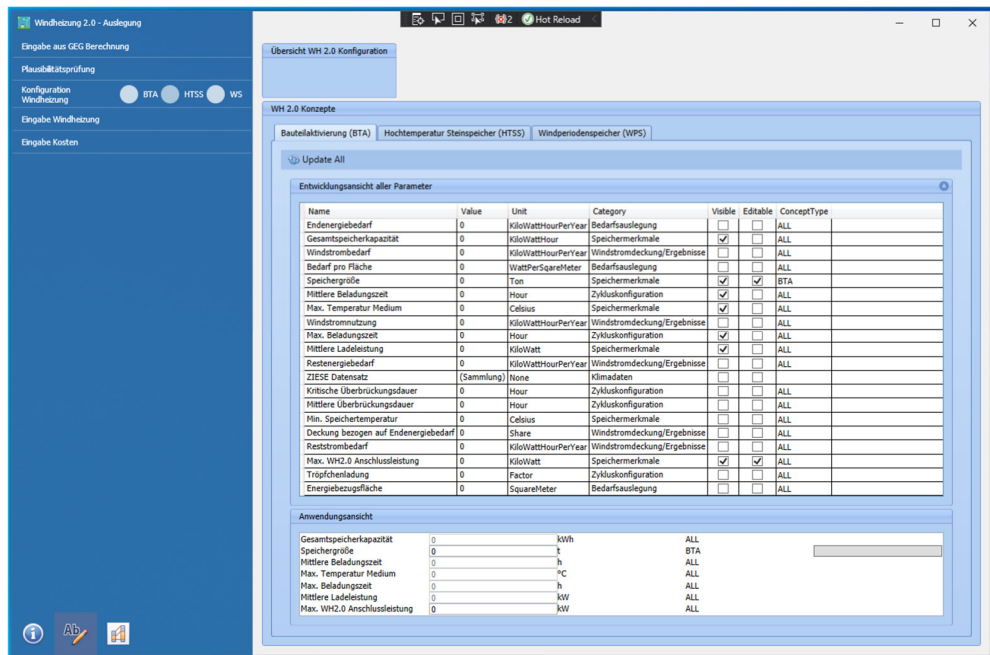


Bild 156:
Bedienoberfläche zur Konfiguration der Windheizung 2.0-Konzepte.

Da die Entwicklung insbesondere in der Gestaltung eines im Hintergrund die Auslegung bestimmenden Berechnungsvorganges besteht, wurde in einem Zwischenschritt der finalen Präsentation auch eine zur Kommunikation mit den Partnern erweiterte Entwicklungsansicht implementiert. In dieser können sowohl die final präsentierten Werte als auch die im Hintergrund als Teilergebnisse und Stellgrößen der Berechnung dienende Werte angezeigt werden. Dies erlaubte eine direkte Abstimmung mit den Planungspartnern, welche die fachlichen Aspekte für das Werkzeug entwickelten.

Die identifizierten Ausgangsgrößen zur Auslegung der Windheizung 2.0-Konzepte wurden in einem Berechnungsverfahren zur Bestimmung des potentiell genutzten Anteils an Überschussstrom an der Deckung des Energiebedarfs zusammengeführt. Eine dazu ausformulierte Berechnungslogik dient als Entwicklungsgrundlage zur Auslegung der Windheizung 2.0-Konzepte. Die Bezeichnung als „Windperiodenverfahren“ geht dabei auf den zugrundeliegenden Ansatz aus der Vorprojektphase zurück [1].

4.2 Windperiodenverfahren

4.2.1 Windheizung 2.0 – GEG-Randbedingungen

Um den hohen Anforderungen an die wärmeübertragende Gebäudehülle als Basis der Windheizungskonzeption zu genügen, erscheint aufgrund des nicht Berücksichtigens solarer Wärmegewinne ein alleine auf die Hüllqualität (HT') ausgerichteter Anforderungswert nicht ausreichend. Daher wurde für die Eignung als Windheizung 2.0-Gebäude ein deutlich, um die Hälfte, verringerter Endenergiebedarf als besserer Anforderungswert identifiziert. Die Datengrundlage die vom GEG- in das Windheizung 2.0-Tool importiert wird muss auf einer definierten Berechnungsgrundlage erfolgt sein, damit der Endenergiebedarf korrekt interpretiert werden kann. Der Endenergiebedarf muss 50 Prozent unter dem des GEG-Referenzgebäudes liegen, um der Mindestanforderung eines Windheizung 2.0-Gebäudes zu entsprechen. Da die Technologie der Windheizung 2.0 (noch) nicht in der DIN V 18599 enthalten ist, muss stellvertretend eine fest definierte „fiktive Anlagentechnik“ angesetzt werden. Diese fiktive Anlagentechnik ist folgendermaßen definiert:

- dezentrale Stromheizung
- dezentrale Warmwasserbereitung mit Durchlauferhitzern
- Wohnungslüftungsanlage mit einem Wärmerückgewinnungsgrad über 85 Prozent

Die Mindestanforderung von 50 Prozent des GEG-Endenergiebedarfs an ein Windheizung 2.0-Gebäude resultiert daraus, dass so ohne weitere gesetzliche Änderungen die Direktstromheizung der Windheizung 2.0 nach GEG nachgewiesen werden kann. Zur Gewährleistung der im Windheizung 2.0-Planungstool ausgewerteten Planungsgrundlagen werden die in diesem Abschnitt dargestellten Kriterien und Modellierungsvorgaben beim Import der Daten aus dem GEG-Tool in einer Eignungsprüfung im Planungswerkzeug kontrolliert. Erst durch die Einhaltung dieser Aspekte bei den Eingangsdaten ermöglicht die Konsistenz der im folgenden dargelegten Berechnungsmethodik, die der Auslegung zugrunde liegt, sowie der darauf aufbauenden Bewertung der ausgelegten Windheizung 2.0-Konzepte.

4.2.2 Windperioden Verfahren – Berechnungslogik idealtypische Speicherentladung

Bei der linearen Berechnung des Speicher-Ladegrads dienen als Ausgangsgrößen die Speichergröße, die Beladeleistung sowie der viertelstündliche Schaltfahrplan zum Vorhandensein von Überschussstrom. Aus der normbasierten Eingangsgröße des monatlichen Energiebedarfs (vgl. die Berechnung Energiebedarf nach DIN TS 18599) wird, zudem bezogen auf die viertelstündlichen Werte zu den potentiellen Schaltzeitpunkten, ein entsprechender Energiebedarfswert ermittelt. Dies geschieht, indem der Monatswert durch die Tage des entsprechenden Monats sowie durch 24 Stunden und dann durch 4 dividiert wird. Zu jedem viertelstündlichen Zeitintervall wird nun, ausgehend von einem vollgeladenen Speicher, jeweils der aktuelle Bedarfswert abgezogen. In einem weiteren

Rechenschritt wird die viertelstündliche Beladeleistung auf den Ladegrad des Speichers addiert, wenn im vorherigen Intervall ein Überschussstromschaltzeitpunkt gegeben ist. Ausgehend von einem zum Startzeitpunkt im Sommer definiert beladenen Speicher wird dann über den Zeitraum von einem Jahr gerechnet. Somit ermöglicht das Windperiodenverfahren einen idealisierten Verlauf des Speicherladestandes abzubilden. Aus der Differenz zwischen der geladenen Überschussstrommenge und des bekannten Endenergiebedarfs wird abschließend die Überschussstromdeckung ermittelt. Nach Abschluss der Messungen und der Varianten-Simulation wird ein geeigneter Korrekturfaktor oder eine geeignete Transferfunktion ergänzt, um diese idealisierte Speichernutzung dem instationär simulierten Speicher- bzw. Gebäudeverhalten anzupassen. Das finale Ergebnis der Windstromdeckung (WSD) wird in drei Iterationsläufen (siehe Bild 157) berechnet, da anfangs sowohl die zur Ermittlung des Anpassungsfaktors notwendige Windstromdeckung (Init-Lauf) als auch der Start-Ladegrad des Speichers (Justier-Lauf) nicht bekannt sind.

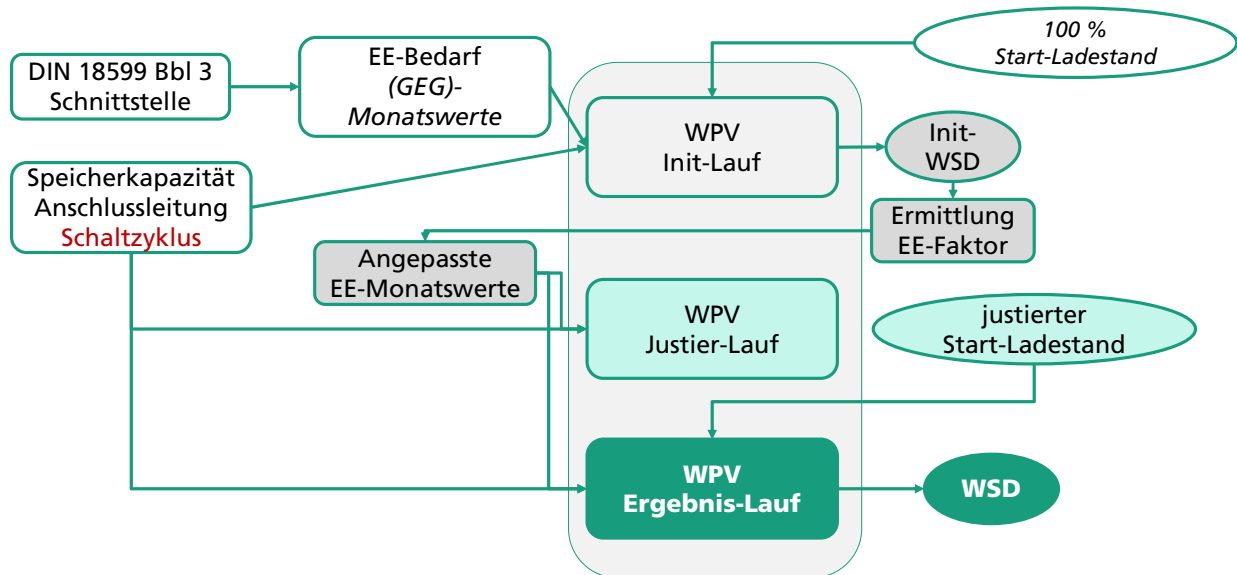


Bild 157: Ablaufdiagramm des Windperiodenverfahrens (WPV) zur Ermittlung der Windstromdeckung (WSD).

Bild 158 zeigt die in einem Tabellendokument spezifizierte Berechnungslogik, mit der die Grundlage zur Bestimmung eines Anteils von genutztem Überschussstrom (Windstrom) sowie des Anteils vom verwendeten Reststrom definiert wird. Die dabei in grün hervorgehobenen Felder stellen die einstellbaren Eingangsgrößen Speicherkapazität und Beladeleistung für die Auslegung des Windheizung 2.0-Konzeptes dar.

| F18943 {=SVERWEIS(C18943;D\$6:E\$17;2)*1000/30,5/24/4} | | | | | | | |
|---|------------------|-----------|-------------|----------|-------------------|-------------------------|--|
| | A | B | C | F | G | H | |
| 1 | | | | | Max. Ladeleistung | Speicherkapazität | |
| 2 | | | | | 50000 | 500000,00 | |
| 3 | wh20-Tool | wh20-Tool | hilfsspalte | aus18599 | wh20-Tool | | |
| 4 | | | | Wh/15min | Wh | Wh | |
| 5 | Time | Value | Monat | Bedarf | Speicherpotential | Genutztes Ladepotential | |
| 18939 | 15.12.2019 05:15 | 0 | 12 | 768 | 53760 | 0 | |
| 18940 | 15.12.2019 05:30 | 0 | 12 | 768 | 52991 | 0 | |
| 18941 | 15.12.2019 05:45 | 0 | 12 | 768 | 52223 | 0 | |
| 18942 | 15.12.2019 06:00 | 1 | 12 | 768 | 51455 | 0 | |
| 18943 | 15.12.2019 06:15 | 1 | 12 | 768 | 63186 | 12500 | |
| 18944 | 15.12.2019 06:30 | 1 | 12 | 768 | 74918 | 12500 | |
| 18945 | 15.12.2019 06:45 | 1 | 12 | 768 | 86649 | 12500 | |
| 18946 | 15.12.2019 07:00 | 1 | 12 | 768 | 98381 | 12500 | |

Bild 158:
Ausschnitt der spezifizierten Berechnungslogik des Windperiodenverfahrens.

4.2.3 Windperiodenverfahren – Bewertung der Windheizung 2.0 durch Bestimmung Überschussstromanteil

Die aus den Einzelschritten während der Ausführung des Windperiodenverfahrens summierten Ergebniswerte dienen als Auslegungsgrundlage der notwendigen Ladeleistung und der Speicherkapazität des Windheizung 2.0-Konzepts durch Ermittlung der erreichbaren Überschussstromdeckung (vgl. Bild 159). Hierfür wird aus den anteilig zusammengestellten Aufwendungen an Überschuss- bzw. Reststrom der Deckungsanteil mit Überschussstrom errechnet, der den Planenden bei der Auslegung die Eignung der ausgelegten Windheizung 2.0-Konzepte anzeigen kann.

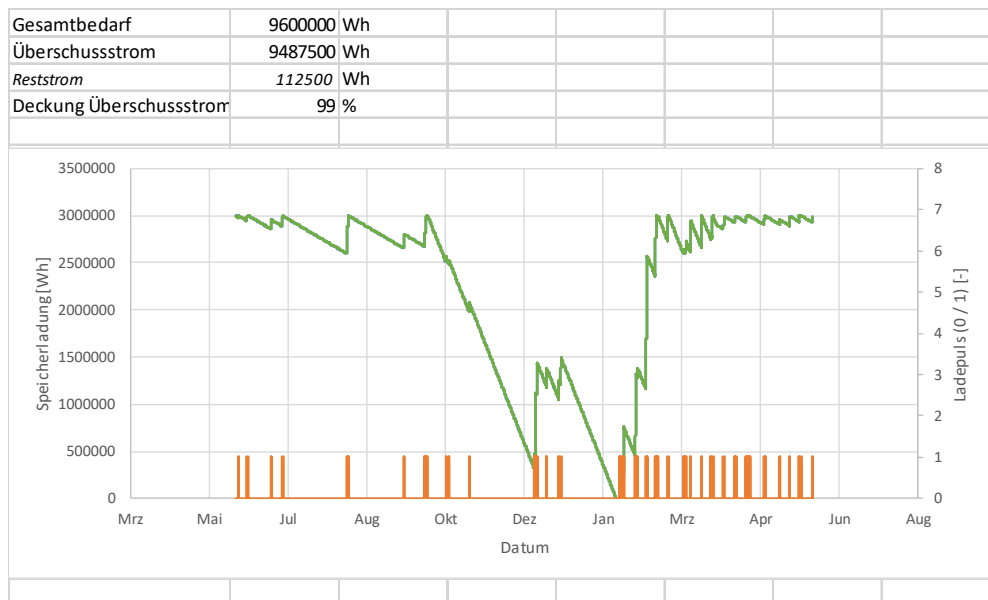


Bild 159:
Ergebnisauswertung Windperiodenverfahren.

4.2.4 Weitere erarbeitete Grundlagen der Werkzeugentwicklung - Variantenmatrix

Neben dieser Erarbeitung von berechnungslogischen Grundlagen zur Entwicklung des IT-gestützten Werkzeuges wird auch auf Seiten von Bemessungsgrundlagen und bezüglich der Werkzeugoptimierung an Möglichkeiten zum Bilden und Einbeziehen von Referenzwerten in die Werkzeugentwicklung sowie an Möglichkeiten das prototypische Werkzeug einzujustieren bzw. zu testen gearbeitet. Hierzu wurde an der Spezifikation einer Variantenmatrix für Stützsimulationen zur Aufbereitung von typischen Kennwerten bestimmter Konstruktionsarten sowie als Validierungsgrundlage bzw. als Grundlage zur (faktorenbasierten) Verfeinerung der Berechnungsverfahren im Auslegungstool mitgewirkt. Die in Tabelle 21 abgebildete Variantenmatrix stellt, bezüglich der avisierten Stützsimulationen, die Parameterkombinationen zum Generieren der Referenzwerte zusammen, die dann als Kenn- bzw. Anpassungswerte in die Auslegungsrechnungen der von den Anwendenden im Werkzeug konfigurierten Windheizung 2.0-Konzepten mit einfließen sollen. Die beiden Typgebäude Zwillingshaus (ZH) und Leitershofen (LH) sind in den IBP-Berichten [1] und [2] zu den beiden Vorgängerprojekten beschrieben.

Gebäudemodelle der beiden Typgebäude wurden mit den detaillierten Speichersystemen, HTSS nach Abschnitt 2.1.7 und BTA nach 2.2.6, sowie dem WWS Detailmodell aus dem Vorgängerprojekt, ausgestattet. Die Randbedingungen, z.B. Luftwechselraten und innere Wärmegewinne, liegen nahe an den Randbedingungen des Monatsbilanzverfahrens (DIN V 18599), welches als Ausgangspunkt für das Planungstool dient. Die Kennwerte der Gebäudebauteile wurden auf den zu erzielenden Gebäudestandard für das Windheizungskonzept verbessert. Des Weiteren wurden den Gebäudemodellen die detaillierten Gesamtsysteme der Windheizung 2.0-Anlagentechnik hinzugefügt und bilden somit die drei Speichersysteme in der Gebäudesimulation ab.

Tabelle 21:
Variantenmatrix zur Darstellung der Parameterkombinationen der Stützsimulationen. In Klammern die verwendeten Kürzel in Variantennamen.

| Parameter | Variation 1 | Variation 2 | Variation 3 |
|----------------------------|--------------------|----------------------|-------------|
| Typgebäude (Geometrie) | Zwillingshaus (ZH) | Leitershofen (LH) | |
| Energiestandard, Typ | Sanierung (S) | Neubau (N) | |
| Windstromprofil | kombiniert (F15) | Kontinuierlich (F25) | |
| Speichersystem | BTA | HTSS | WWS |
| Anschluss- / -Ladeleistung | 20 kW (S20) | 50 kW (S50) | |
| Speichergröße / Kapazität | 100 % (G125) | 90 % (G100) | 80 % (G75) |

Anhand der Wohngebäudetypen in der ersten Zeile der Tabelle 21 werden in der Variantenmatrix verschiedene Aspekte, ob es sich um einen Neubau- oder ein Sanierungsprojekt handelt, das verwendete Speichersystem, oder ob eine bestimmte Ladeanschlussleistung vorliegt, sowie weitere fachliche Aspekte variiert. Es werden zwei Windstromprofile untersucht. Bei dem ersten handelt es

sich um die Schaltvorschläge nach Abschnitt 5.7. Das zweite Signal ist ein kontinuierlich abwechselndes Profil mit 9 Stunden beladen und einem 240 Stunden Überbrückungszeitraum. Die Kapazität des Speichers wird variiert. Der HTSS- und WWS-Speicher ist mit drei Variationen untersucht, um 100 Prozent, 90 Prozent und 80 Prozent des Energiebedarfs des längsten Überbrückungszeitraums, Schaltsignals nach Abschnitt 5.7 zu decken. Die Variationen mit BTA-System sind von der Gebäudegeometrie abhängig. Es werden im Fall 80 Prozent die Innenwände aktiviert und in den Fällen mit 90 Prozent die Innendecken. In den Varianten mit 100 Prozent werden die Innendecken und -wände aktiviert, bzw. mit dem BTA-System ausgestattet. Die jeweiligen Größen der Speicher sind je nach System in Tabelle 22 zusammengefasst. Insgesamt sind in der Zusammenstellung als Matrix 144 Stützsimulationen als Basis der Kennwertgenerierung spezifiziert.

Tabelle 22:

Angenommene Speichergrößen der Stützsimulationen in der Speicherspezifischen Mengen-Einheit.

| | WWS | | | | HTSS | | | | BTA | | | |
|------|---------|---------|---------|---------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| | ZH | | LH | | ZH | | LH | | ZH | | LH | |
| | N | S | N | S | N | S | N | S | N | S | N | S |
| | [Liter] | [Liter] | [Liter] | [Liter] | [m ³] | [m ³] | [m ³] | [m ³] | [m ²] | [m ²] | [m ²] | [m ²] |
| 100% | 4.570 | 11.050 | 11.900 | 41.840 | 1,79 | 1,79 | 2,23 | 5,37 | 170 | 170 | 480 | 480 |
| 90% | 2.190 | 4.630 | 4.820 | 21.480 | 0,99 | 1,39 | 1,79 | 2,23 | 81 | 81 | 272 | 272 |
| 80% | 1.560 | 3.060 | 3.020 | 9.000 | 0,79 | 0,99 | 1,39 | 1,79 | 89 | 89 | 208 | 208 |

4.2.5 Validierung und Justierung des Windperiodenverfahrens

Die Ergebnisse der in Tabelle 21 dargestellten Stützsimulationen werden mit den Ergebnissen des ursprünglichen Windperiodenverfahrens (WPV) verglichen. Naturgemäß ergeben sich Abweichungen, die sowohl die Überschussstromdeckung (ÜSD) als auch den absoluten (End-)Energiebedarf betreffen. Um eine bessere Übereinstimmung der Ergebnisse des WPV mit den deutlich detaillierteren Simulationen zu erreichen, werden drei Anpassungsfaktoren entwickelt. Mit Hilfe des ersten („EE-Faktor“) wird der Endenergiebedarf des Winterhalbjahrs (Oktober bis März) für Heizung und TWW aus der GEG-Berechnung multipliziert, um die Energiemenge anzupassen. Der zweite Faktor (EE-Faktor-Sommer) dient der Anpassung des TWW-Bedarfs des Sommerhalbjahres. In einem dritten Schritt wird der „KAP-Faktor“ festgelegt, der im Rahmen des WPV mit der angesetzten Speicherkapazität des Windheizung 2.0-Systems multipliziert wird, um die ÜSD anzupassen. Diese Anpassung wird mit dem bereits korrigierten Wärmebedarf durchgeführt. Wie in Tabelle 23 erkannt werden kann, ergibt sich der mittlere EE-Faktor des Winters zu 1,1, der EE-Sommer zu 1,70 und der KAP-Faktor zu 1,0.

Dies bedeutet, dass der winterliche Energiebedarf im Vergleich mit der GEG-Berechnung um 10 Prozent steigt. Dies ist erwartungsgemäß, da sich die Raumlufttemperaturen auf Grund der passiven Speicherentladung erhöhen und somit auch die Wärmeverluste steigen. Da die Windheizung 2.0 ihre ökologischen, ökonomischen, netz- und marktdienlichen Vorteile durch den zeitlich

optimierten Strombezug mit einer entsprechend reduzierten CO₂-Last erschließt, ist dieses Ergebnis kein Widerspruch zu den Entwicklungszielen der Windheizung 2.0, sondern ein erwarteter Nebeneffekt. Im Sommer steigt der Wärmebedarf (für TWW) sogar um 70 Prozent, da hier die Speicherverluste nicht nutzbar sind. Bei der Interpretation dieses Wertes muss bedacht werden, dass als Vergleich hier in der zugehörigen Windheizung 2.0-GEG-Berechnung ein direktelektrisches System der TWW-Bereitung ohne Speicher oder Verteilverluste betrachtet wird.

Da die in Tabelle 23 beobachteten Standardabweichungen relativ hoch sind, wird in Bild 160 bis Bild 166 für den winterlichen EE-Faktor und den KAP-Faktor untersucht, ob durch die Einbeziehung unterschiedlicher Berechnungsparameter die Genauigkeit des WPV weiter verbessert werden kann. Hierbei werden ausschließlich solche Parameter betrachtet, die entweder aus der GEG-Berechnung entnommen werden, oder im Rahmen des WPV eingegeben oder berechnet werden können. Simulationsergebnisse werden nicht untersucht, da sie im regulären Planungsprozess nicht verfügbar sein werden. Da für den KAP-Faktor mit Hilfe der verfügbaren Eingangsparameter kein eindeutiger Zusammenhang hergestellt werden kann, werden die Mittelwerte nach Tabelle 23 verwendet. Für den winterlichen EE-Faktor kann ein Zusammenhang mit der im Windheizung 2.0-Tool errechneten Überschussstromdeckung (ÜSD) erkannt werden. Dieser Zusammenhang wird in Bild 166 unter Verwendung einer Ausgleichsgeraden modelliert. Das Ergebnis ist in Tabelle 23 enthalten. Zur Berechnung der in Tabelle 23 gelisteten Mittelwerte und Koeffizienten werden lediglich Datenpunkte von Varianten mit einer ÜSD \geq 75 Prozent herangezogen, da nur diese Datenpunkte relevante technische Lösungen repräsentieren.

Tabelle 23:
Mittelwerte und einfache Standardabweichung der EE- und des KAP-Faktors basierend auf der Gesamtheit aller Stützsimulationen.

| | Mittelwert [-] | Festlegung [-] | Standardabweichung [-] |
|------------------|-------------------|----------------------|--|
| EE-Faktor | 1,10 | 0,858 + ÜSD*0,332 | Prognosefehler der Ausgleichsgeraden @ÜSD= 80 % ±0,50 |
| EE-Faktor-Sommer | 1,70 | 1,7 | ±0,35 |
| KAP-Faktor | 1,04 | 1,0 | ±0,17 |

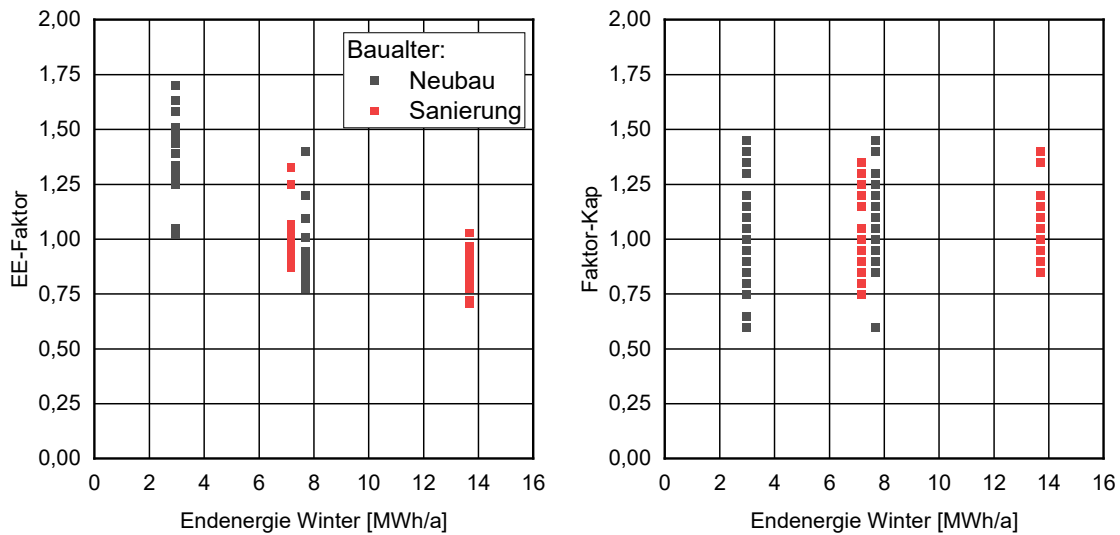


Bild 160:
Werte der winterlichen EE-Faktoren (links) und der KAP-Faktoren (rechts) in Abhängigkeit vom winterlichen Endenergiebedarf nach GEG (EE-Winter) und dem Baualter.

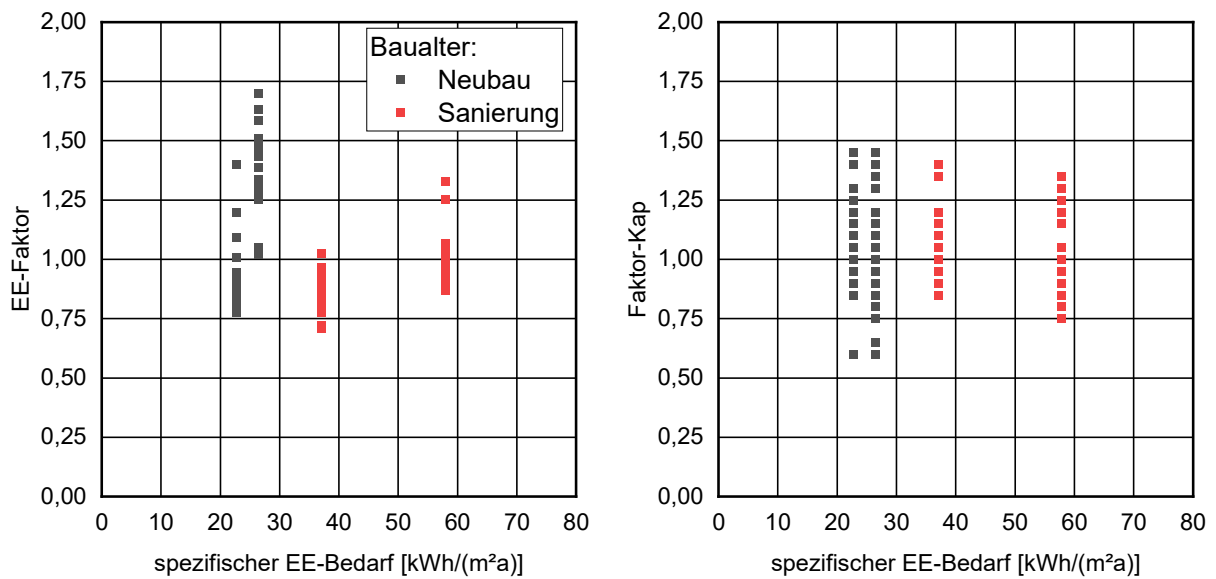


Bild 161:
Werte der winterlichen EE-Faktoren (links) und der KAP-Faktoren (rechts) in Abhängigkeit vom spezifischen, Flächenbezogenen Endenergiebedarf nach GEG (EE-Winter) und dem Baualter.

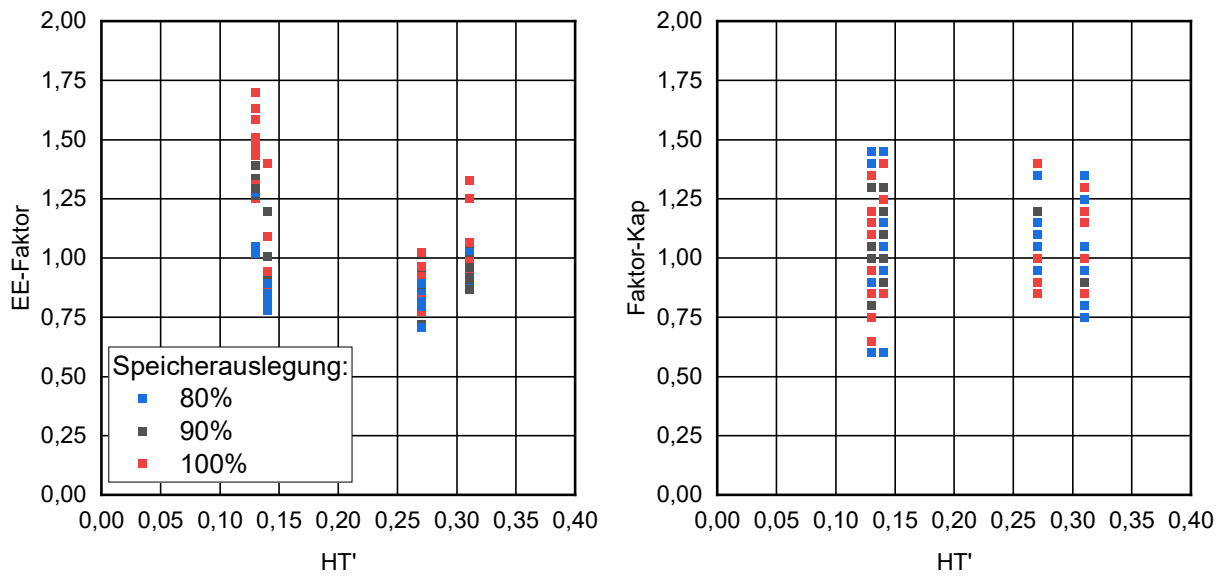


Bild 162:
Werte der winterlichen EE-Faktoren (links) und der KAP-Faktoren (rechts) in Abhängigkeit vom HT' der Gebäudehülle und dem Auslegungsziel (ÜSD) des Windheizung 2.0-Speichers.

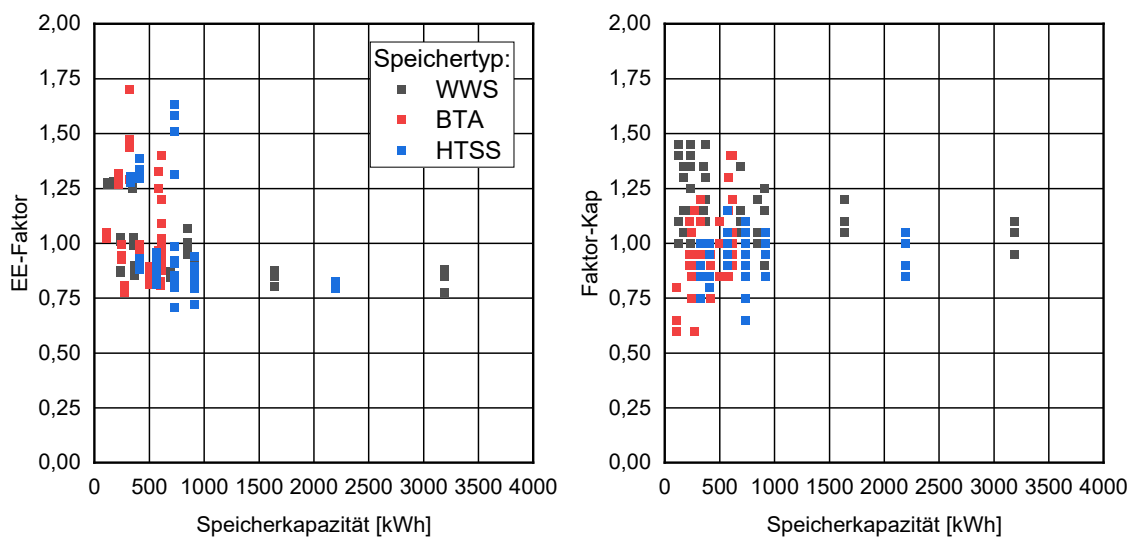


Bild 163:
Werte der winterlichen EE-Faktoren (links) und der KAP-Faktoren (rechts) in Abhängigkeit von der Auslegungskapazität des Windheizung 2.0-Speichers und vom Speichertyp.

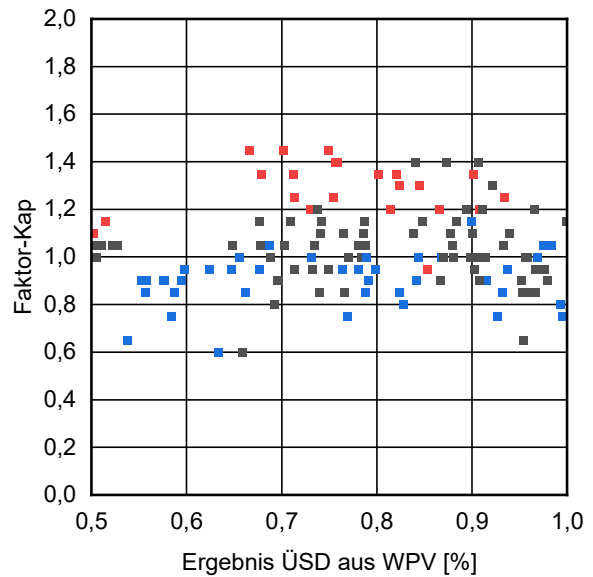
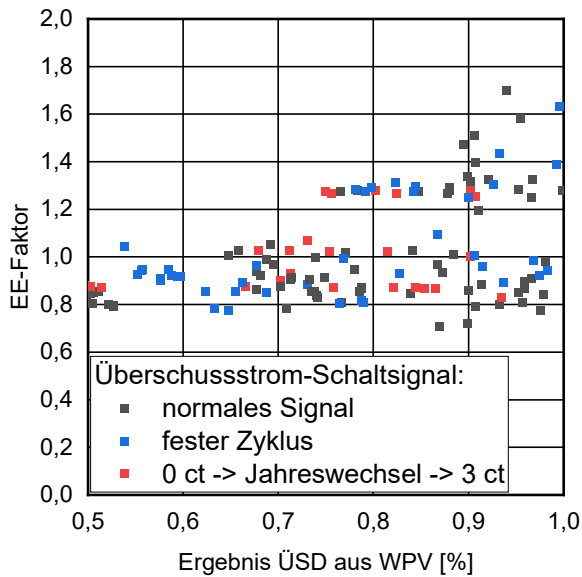


Bild 164:

Werte der winterlichen EE-Faktoren (links) und der KAP-Faktoren (rechts) in Abhängigkeit von der im Windheizung 2.0-Planungstool (WPV-Methode) ermittelten ÜSD und dem Überschussstrom-Schaltsignal. Untersucht wurden das „normale“ Signal nach Abschnitt 5.7, der in Abschnitt 4.2.4 beschriebene feste Zyklus. Für den WWS wurde anfangs ein weiteres Signal untersucht, bei dem erst 0 ct/kWh und ab dem Jahreswechsel 3 ct/kWh akzeptiert wurden; für die anderen Speichertypen wurde dieses Signal wieder verworfen.

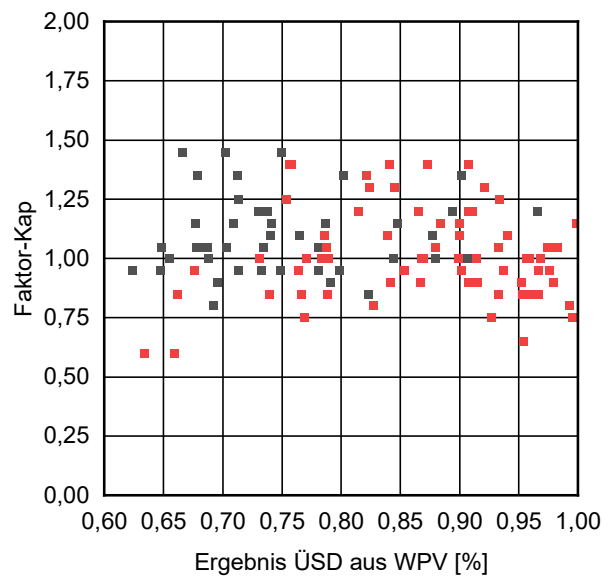
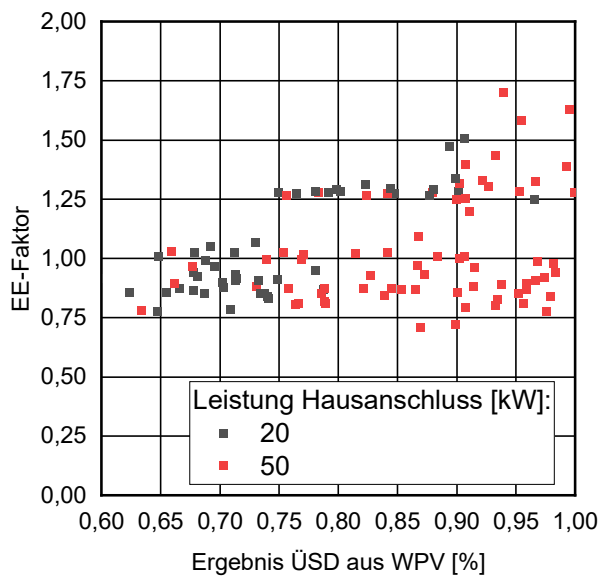


Bild 165:

Werte der winterlichen EE-Faktoren (links) und der KAP-Faktoren (rechts) in Abhängigkeit von der im Windheizung 2.0-Planungstool (WPV-Methode) ermittelten ÜSD und der verfügbaren Leistung des Hausanschlusses.

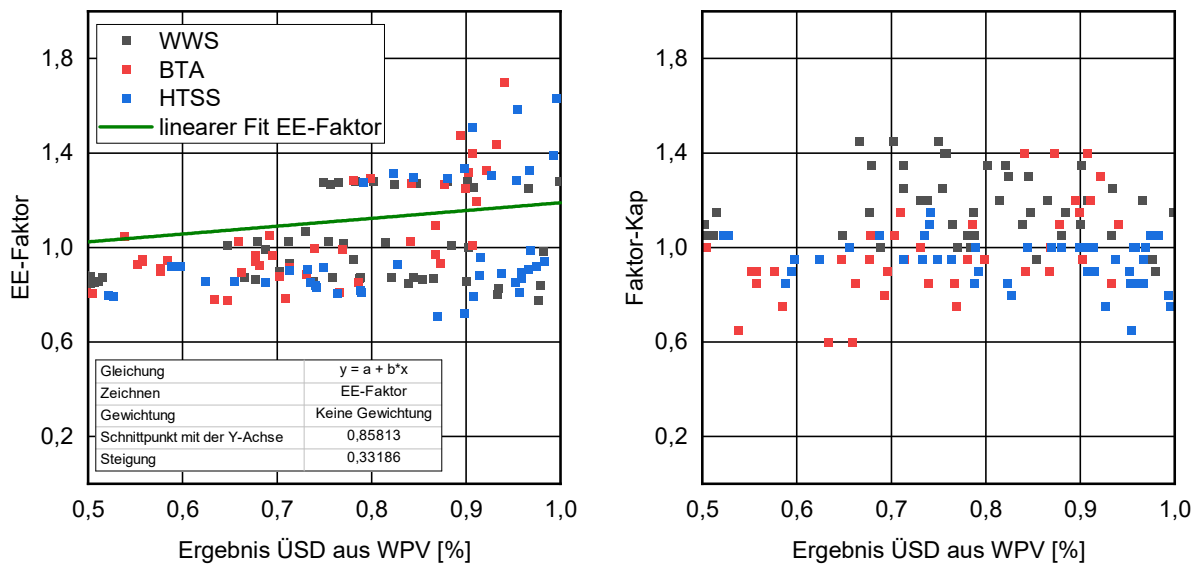


Bild 166:

Werte der winterlichen EE-Faktoren (links) und der KAP-Faktoren (rechts) in Abhängigkeit von der im Windheizung 2.0-Planungstool (WPV-Methode) ermittelten ÜSD und dem Speichertyp.

4.3 Umsetzung und Bedienoberfläche des Planungstools

Den Schwerpunkt in den Entwicklungsarbeiten bildete die Umsetzung der Konfiguration der Windheizung 2.0-Speicherkonzepte im Werkzeug. Dabei konnten die verschiedenen Eingabedaten, wie die Fahrpläne bezüglich der Verfügbarkeit von Überschussstrom als Rahmenparameter des Windperiodenverfahrens (siehe Abschnitt 5.7) oder die von einem GEG-Werkzeug exportierte Dokumentation zur Energiebilanz (vgl. DIN TS 18599 Beiblatt 3) als spezifische Ausgangsgröße zur Auslegung der Windheizung 2.0-Konzepte angebunden werden. Ergänzend wurden Ansichten zur Eingabe weiterer benötigter Parameter entwickelt. Darauf aufbauend wurde im Betrachtungszeitraum (25 Jahre) die Berechnungslogik des Windperiodenverfahrens als ausführbare Programmfunktion umgesetzt. Dabei wurden jeweils spezifische Eingabedialoge für die einzelnen Konzepte BTA, HTSS und WWS sowie eine Kombinationsübersicht im Konfigurationsfenster zusammengeführt und als Teil der Bedienoberfläche des Prototyps eingearbeitet.

4.3.1 Der Informationsbereich im Planungstool

Der Informationsbereich beinhaltet neben allgemeinen Informationen zur Windheizung 2.0 auch spezielle Fachbeiträge zu den Arbeiten der Forschungs- und Industriepartner im Projektrahmen. Zudem werden Beschreibungen zum Planungstool selbst und weiterführende Quellen darin aufbereitet.

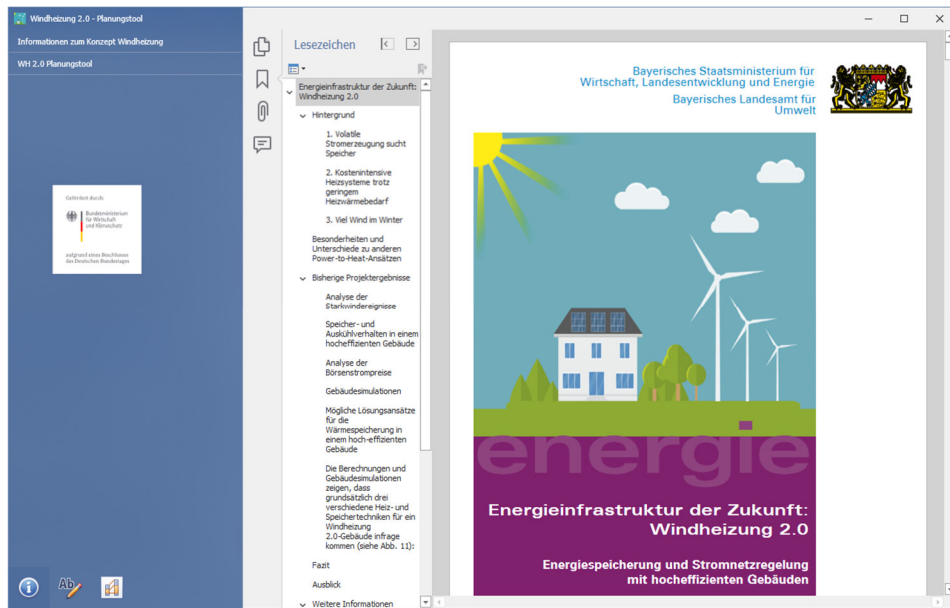


Bild 167:
Startseite des Planungstool mit angezeigten Informationen zum Thema Windheizung 2.0.

4.3.2 Standardbasierter Gebäudedatenimport aus dem GEG-Tool in das Windheizung 2.0-Planungstool

Das Planungswerkzeug verfügt zur Bedienung unterschiedlicher GEG-Tools für die Lieferung der Energiebedarfsberechnungsdaten über eine (normbasierten) Eingangsschnittstelle. Sie ermöglicht es, einen Datensatz zur Energiebilanzierung gemäß der Dokumentationsrichtlinie DIN V 18599 Beiblatt 3 in einem durch ein entsprechendes für die XML Notation vorliegenden Schema spezifizierten Formates in das Werkzeug einzulesen. Ein Ausschnitt dieses maschinenlesbaren Dokuments ist in Bild 168 dargestellt, dessen von der Norm vorgegebene formale Gestaltung dann in Bild 169 im Oberflächenfenster nach dem Importieren zur Durchsicht präsentiert wird.

```
<?xml version="1.0"?>
<Supplement3Project
  xmlns:xsi="http://www.w3.org/2001/XMLSchema-instance"
  xmlns:xsd="http://www.w3.org/2001/XMLSchema"
  xmlns="http://www.18599siegel.de/schema/Beiblatt3">
  <Name>Neues Gebäude</Name>
  <CalculatedBasedOn18599Edition>DIN V 18599:2018-09</CalculatedBasedOn18599Edition>
  <FullName>Neues Gebäude</FullName>
  <AddressOfBuilding />
  <AddressOfEnergyAuditor />
  <Building>
    <FloorSpaceCalculatedFromTotalVolume>0</FloorSpaceCalculatedFromTotalVolume>
    <NumberOfFullFloors>1</NumberOfFullFloors>
    <BuildingAutomation>
```

Bild 168:
Auszug aus dem XML Instanzdokument eines DIN V 18599 Beiblatt 3 Datensatzes.

Dabei ermöglicht das offene XML Format als Eingangsschnittstelle die Eingabe von Eingangsinformationen zur Energiebilanz als Basis der Auslegung der Windheizungskonzepte allen GEG-Tools bzw. Werkzeugen, die diese Schnittstelle bedienen, als auch durch die menschenlesbare XML Notation eine manuelle Text-Eingabe direkt in dem XML-Dokument.

Bei Import dieses Dateiformates wird zunächst eine Beiblatt 3 Dokumentation als PDF daraus generiert und in einer Ansicht präsentiert (vgl. Bild 169). Von dem importierten Datenmodell wird intern eine Windheizung 2.0 Projektdatei angelegt, in der sukzessive die Konfigurationsdaten abgespeichert werden. Somit gehen keine Anwendungsdaten verloren und es können verschiedene Varianten auf Basis eines Eingangsdatensatzes erstellt und gesichert werden.

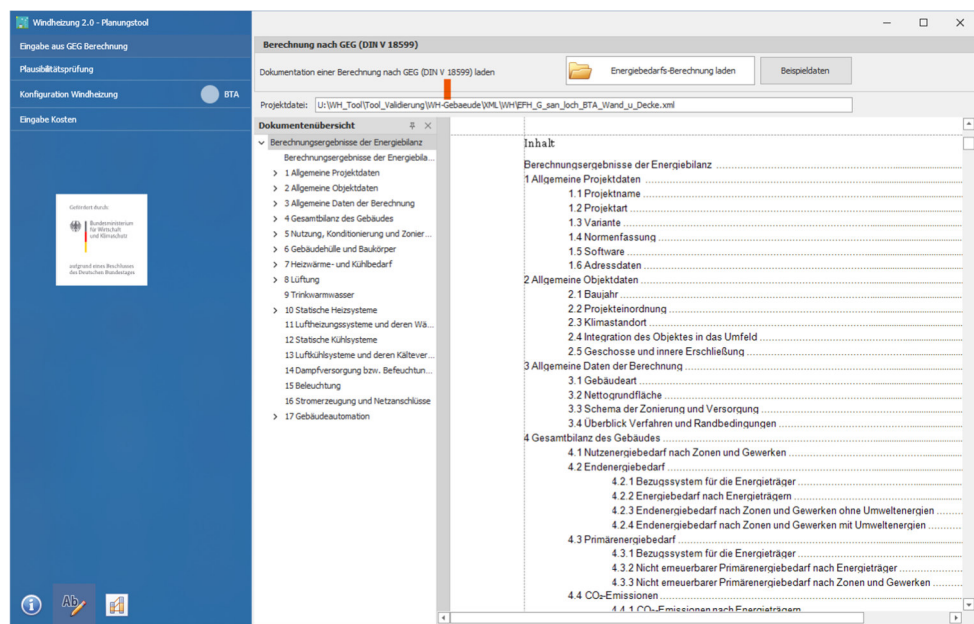


Bild 169:
Bedienoberfläche zum Importieren und Anzeigen des Datensatzes gemäß DIN V 18599 Beiblatt 3.

Im zweiten Reiter werden die importierten GEG-Daten auf die festgelegten Windheizung 2.0 Kriterien geprüft. Damit wird die Eignung der eingelesenen Gebäudedaten zur Konfiguration einer Windheizung 2.0 Konzeption festgestellt (vgl. Bild 170).

| Planungstool | |
|--|--|
| chnung | Prüfung der Ausschlusskriterien |
| | <p>✓ Anforderungen nach GEG erfüllt (Q_p und H_f) $Q_p = 74,58 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ $H_f = 0,41 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$</p> |
| zung | <p>✓ Endenergiebedarf ist kleiner als 50% des Anforderungswerts vom Referenzgebäude $Q_i: 8576,36 \text{ kWh/a} < 0,5 Q_{i,ref}: 14985,45 \text{ kWh/a}$</p> |
| | <p>✓ "Fiktive" Anlagentechnik Stromdirektheizung</p> |
| <p>rdic: Bundesministerium für Wirtschaft Klimaschutz</p> <p>es Beschlüssen in Bundestagen</p> | |

Bild 170:
 Ansicht der Eignungsprüfung der in das Planungstool importierten Energiebedarfsberechnungsdaten aus dem GEG-Tool.

Das Bedienen der standardisierten Dokumentation der Energiebilanzierung als Eingangsdatenformate ermöglicht es von GEG-Planungsprojekte sowohl die Energiebedarfswerte, als die Bauteile (Aufbauten und Flächen) einzulesen. Letztere Information bezieht sich auf Innenbauteile und geht diesbezüglich über die in der Energiebilanzierung auf die Hüllelemente ausgerichtete Verwendung des Datenformats hinaus. Die erweiterte Anwendung des ursprünglich auf rein energetische Informationen ausgelegte Eingangsformat steht dabei auch vor dem Hintergrund einer Wiederverwendung als einheitliche Datenbasis (bzw. eindeutigen Wahrheitsquelle) bezüglich der Bauwerksinformationen (auch) für die weiteren im Werkzeug behandelten Aspekte (wie z.B. der affine Informationsbedarf auf Seiten der Ökobilanz). Neben der Schnittstelle zum Einlesen des GEG-Planungsprojektes konnten auch andere Datenquellen angebunden werden, wie z.B. die tabellarisch dokumentierten Überschussstrom-Fahrpläne, welche die Verfügbarkeit von Überschussstrom als Randbedingung des Windperiodenverfahrens beisteuern. Das umgesetzte Einlesen der Daten als Tabellendokumente ermöglicht prinzipiell, für eine Berechnung neben den fest im Werkzeug verankerten Referenzdatensätzen auch ggf. vom Versorger gelieferte, regionalspezifische Datensätze zu verwenden. Die implementierte (normbasierte) Eingangsschnittstelle von Daten aus der normativen GEG-Energiebilanzierung

und die weiteren realisierten Datenschnittstellen sowie die zur Auslegungsbe-
rechnung der Überschussstromdeckung benötigten Parameter wurden auf Sei-
ten der Werkzeugentwicklung in einem internen Datenmodell integriert. Dieses
ermöglicht es, alle Zustände der für das Windperiodenverfahren benötigten Ein-
gangs- sowie Ergebnisdaten konsistent vorzuhalten. Neben der mit einer aktu-
ellen Instanz dieses Datenmodells den Anwendenden durch die Anbindung an
die Bedienoberfläche präsentierten Variante seiner Windheizung 2.0 Konzept-
konfiguration können weitere Konfigurationsvarianten zu den gleichen GEG-
Ausgangsdaten als zusätzliche Instanzen parallel vorgehalten werden. Dadurch
wird es ermöglicht, diese einzelnen Datenobjekte zu den verschiedenen Varian-
ten bei Bedarf beispielsweise zur (Weiter-) Bearbeitung bzw. zu Variantenver-
gleichen aufzurufen.

4.3.3 Windheizung 2.0-Auslegungswerkzeug im Planungstool

Aufbauend auf dieser datentechnischen Basis wurden die Bedienoberflächen
zur Konfiguration der Windheizung 2.0-Konzepte entwickelt. Entwicklungsmetho-
disch wurde dabei die Darstellung der Parameter und Elemente, vorberei-
tend zur finalen Oberflächengestaltung, zunächst in einer vollfunktionalen Ent-
wickleransicht aufbereitet und anschließend entwicklungsbegleitend iterativ mit
den Partnern verfeinert und optimiert. Den funktionalen Kern dieses Teils des
Werkzeugs bildet die Implementierung der spezifizierten Berechnungslogik und
deren Anbindung an das interne Datenmodell für die zugrundeliegenden Para-
meter sowie die erforderlichen Eingangsgrößen. Als visuelle Ausgabe der Er-
gebnisse dient, wie bereits durch die konzipierte tabellarische Vorgabe spezifi-
ziert, ein Diagrammelement (vgl. Detailansicht Windperiodenverfahren in Bild
171).

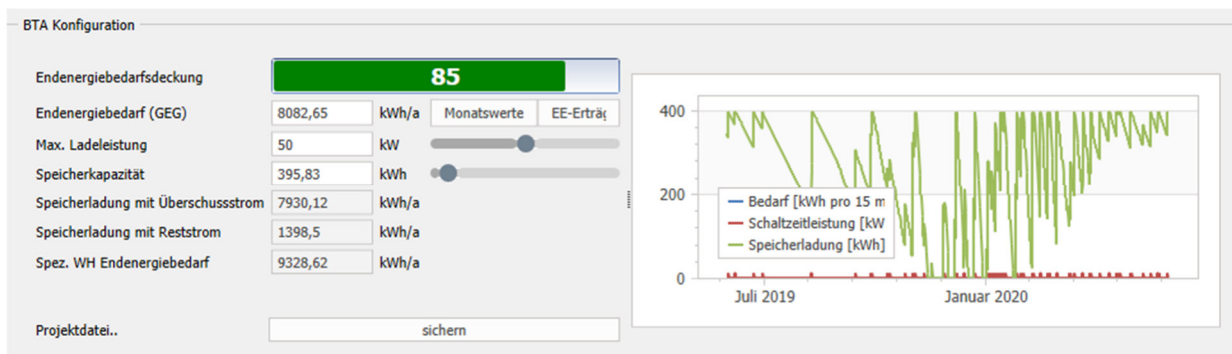


Bild 171:
Ansicht der Parameter zur implementierten Berechnungslogik „Windperioden-
verfahren“.

Zur Eingabe von spezifischen Konfigurationsparametern der einzelnen Windhei-
zung 2.0-Konzepte, wie beispielsweise die aktivierten Innenbauteile der BTA-
Speicher oder die Speichergröße des HTSS, werden ergänzend zu den gemein-
samen Ansichtselementen des zentralen Windperiodenverfahrens einzelne
zweckmäßige Eingabedialoge erstellt. Beispielsweise stellt Bild 172 den Dialog
zur Konfiguration der Windheizung 2.0 Bauteilaktivierung (BTA) dar. An dieser

Stelle wird die als Speicher genutzte Masse eines BTA-Innenbauteils definiert. Bereits beim Einlesen der XML übergebenen Bauteilinformationen aus dem GEG-Werkzeug (vgl. DIN TS 18599 Beiblatt 3) werden in Bild 172 dargestellten Bauteilliste aufgeführt und können bei Bedarf angepasst werden. Durch das optionale Einfügen weiterer Innenbauteile können im Dialog die zur Bauteilaktivierung einzubeziehenden Elemente ausgewählt werden. Die dadurch summierte Speichermasse geht direkt als Eingangsgröße in das Windperiodenverfahren ein.

| BTA | Bezeichnung | Typ | Fläche [m ²] | Kerndicke | Materialkennwert | Volumen [l] | Gewicht [t] | Kapazität [Wh] |
|-------------------------------------|-------------------------|---|--------------------------|-----------|--|-------------|-------------|----------------|
| <input checked="" type="checkbox"/> | EG Decke | Neubaudecke [Beladehöhe: 15° K = (min) 2l] | 100 | 20 | Stahlbeton [ρ = 2400 kg/m ³ c = 0,278 Wh/(kg K)] | 20 | 48 | 13344 |
| <input checked="" type="checkbox"/> | EG Wand Wohnzimmer-Flur | Neubauwand [Beladehöhe: 15° K = (min) 2l] | 35 | 125 | Kalksandstein [ρ = 2000 kg/m ³ c = 0,278 Wh/(kg K)] | 43.75 | 87.5 | 24325 |
| <input type="checkbox"/> | Innenbauteil | Bitte den Bauteiltyp wählen. Beladehöhe bestimmt das Spiel | 0 | 0 | Bitte Material wählen. [Rohdichte ρ Wärmekapazität c] | 0 | 0 | 0 |

Bild 172: Benutzeransichten zur Eingabe spezifischer Konfigurationsparameter der Windheizung 2.0-Speicherkonzepte.

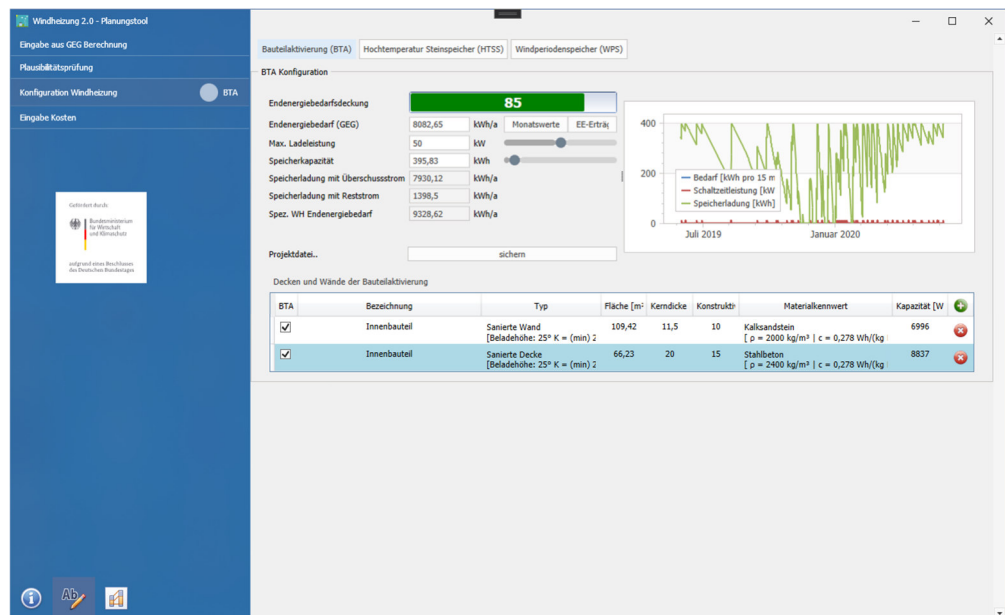


Bild 173: Ansicht der Konfigurationsoberfläche für die Windheizung 2.0 Konzepte am Beispiel der BTA Eingabe.

Neben der Konfiguration der einzelnen Windheizung 2.0-Konzepte können im Eingabebereich des Planungstools ebenfalls als Grundlage der Auswertung einer ausgelegten Windheizung 2.0-Variante Kostendaten von den Anwenden-

den eingegeben werden. Dies ermöglicht es auf die dynamische Preisentwicklung im Baubereich und den Energieträgern einzugehen, indem die auf Basis des Bau-Kosten-Index (BKl) von Ende 2021 hinterlegten Baupreise bzw. Randbedingungen zur Wirtschaftlichkeitsbetrachtung anhand der Kapitalwertmethode an die eigene Planungssituation oder lokalen Spezifika angepasst werden können. Das Bild 174 zeigt die als Tabelle mit verknüpften Feldern präsentierte Eingabemöglichkeit der Kostendaten in der entsprechenden Ansicht.

| | A | B | C | D | E | F | G |
|--|--|--------------------------------|---|---------------------|---|----------------------------|---|
| Kostentabelle Windheizung 2.0 | | | | | | | |
| 1 aufgrund der dynamischen Baupreisentwicklungen wurde BKl Kostensätze für 2021 zugrunde gelegt. | | | | | | | |
| 22 | Hochtemperaturstspeicher | 5340 €/t | | Preise Ende 2021 | | | |
| 23 | Wasser-Windperiodenspeicher | 1000 €/1000l | | | | | |
| 24 | WH2.0-BTA-Aktivierung Innenwand: Neubau | 325 €/m ² | | | | | |
| 25 | WH2.0-BTA-Aktivierung Innenwand: Sanierung | 325 €/m ² | | | | | |
| 26 | WH2.0-BTA-Aktivierung Decke: Neubau | 141 €/m ² | | Preise Ende 2021 | | | |
| 27 | WH2.0-BTA-Aktivierung Decke: Sanierung | 325 €/m ² | | Preise Ende 2021 | | | |
| Erzeugung (Wärme) | | | | | | | |
| 30 | Gas-Brennwertgerät | 4000 €/Stück | | GEG Referenz | | | |
| 31 | Solaranlage | 300 €/m ² Kollektor | | GEG Referenz | | | |
| 32 | Wärmepumpe Wasser-Wasser | 2500 €/Stück | | | | | |
| 33 | Durchlauferhitzer | 250 €/Stück | | | | | |
| 34 | Elektroheizstab | 900 €/Stück | | | | | |
| 35 | Frischwasserstation /-modul | 1200 €/Stück | | | | | |
| 36 | Luft-Nachheizler / Heißluft-Nachheizler | 600 €/Stück | | | | | |
| 37 | Dezentrales Lüftungsgerät | 600 €/Stück | | | | | |
| 38 | Lüftungsanlage WRG | 57,5 €/m ² | | | | | |
| Verteilung und Speicherung | | | | | | | |
| 40 | Puffer | 1500 €/Stück | | GEG Referenz | | | |
| 41 | Pumpen | 450 €/Stück | | WH und GEG Referenz | | | |
| 42 | Wärmetauscher | 1200 €/Stück | | | | | |
| 43 | Raumwärme: Kupferrohr [m/m ²] | 19 €/(m/m ²) | | | | | |
| 44 | Lüftung: PVC-Rohr / Stahlblech verzinkt m/m ² | 15 €/(m/m ²) | | | | | |
| Übergabe | | | | | | | |
| 46 | Heizkörper | 70 €/m ² Kollekt | | GEG Referenz | | Ansatz: 1xHK pro 13qm Wfl. | |
| 47 | FB-Heizung | 70 €/m ² | | | | | |
| 48 | Abluftanlage | 3000 € | | GEG Referenz | | | |
| Energiekosten (€/kWh) | | | | | | | |
| 51 | Kosten Überschussstrom kWh | 0,0883 €/kWh | | | | | |
| 52 | Kosten Strommix kWh | 0,25 €/kWh | | WH und GEG Referenz | | | |
| 53 | Kosten Gas kWh | 0,194 €/kWh | | GEG Referenz | | | |

Bild 174:
Ansicht der Konfigurationsoberfläche für die Kostendaten als Grundlage der ökonomischen Auswertung.

4.3.4 Auswertungen im Planungstool

Die in den Konfigurationsansichten ausgelegte Windheizung 2.0-Konzeption bildet, zusammen mit den ebenfalls im Bearbeitungsbereich durch die Anwendenden bearbeitbaren Kostendaten, die Grundlage zum Auswerten der Windheizung 2.0-Planungen vor einem ökologischer bzw. ökonomischer Hintergrund im dritten Bereich des Planungstools. Hieraus lassen sich für eine konkrete Arbeit mit dem Tool, entsprechende Entscheidungsgrundlagen zur erweiterten Machbarkeitsstudie sowie Kommunikation der erarbeiteten Lösungen erstellen. Beim Wechsel in diesen Bereich wird zunächst in der Energieansicht eine Übersicht der energetischen Aspekte präsentiert (vgl. Bild 175). Im Wesentlichen wird der bereits bei der Auslegungsansicht dargestellte Überschussstromanteil bei der Endenergiebedarfsdeckung dem des GEG-Referenzgebäudes gegenübergestellt.

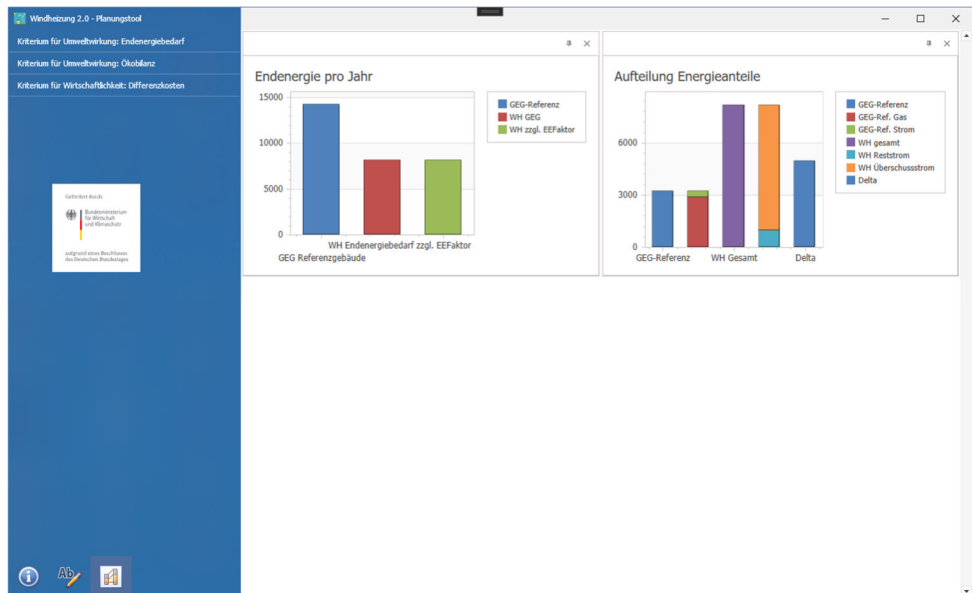


Bild 175:
Ansicht der energetischen Übersicht zum konfigurierten Windheizung 2.0-Konzept.

Über den zweiten Reiter „Kriterium für Umweltwirkung: Ökobilanz“ kann die ökologische Auswertung der Umweltwirkung zum konfigurierten Windheizung 2.0 Konzepte aufgerufen werden (vgl. Bild 176). Neben dem GWP zur Darstellung der äquivalenten CO₂-Emission wird der Einsatz nicht erneuerbarer Primärenergie (PENRT) jeweils als unterschiedliche detailliert aufgeteilte Balken dargestellt.

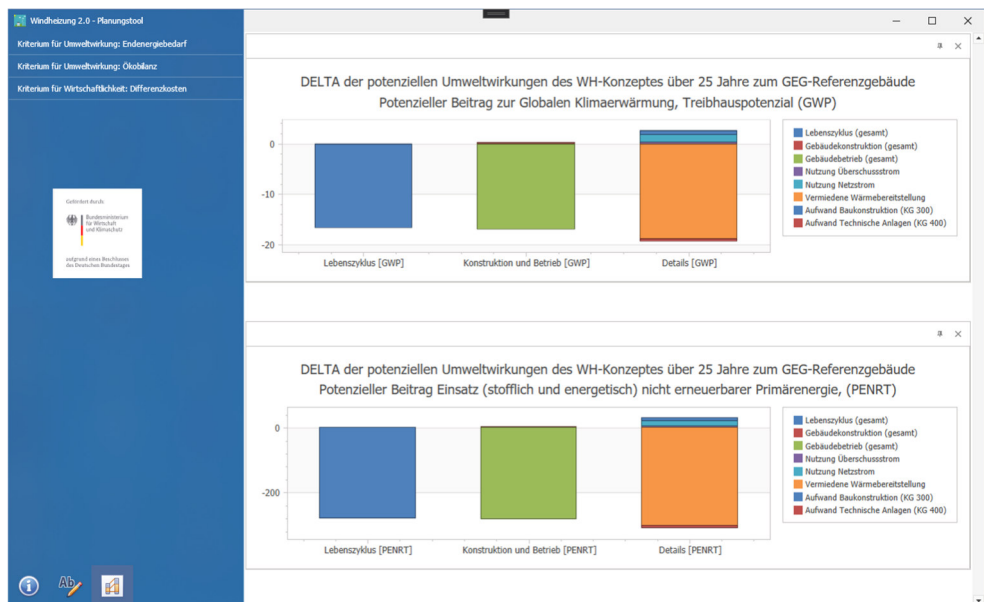


Bild 176:
Ansicht der ökologischen Auswertung zum konfigurierten Windheizung 2.0-Konzept.

In der ökonomischen Auswertungsansicht (vgl. Bild 177) werden dann die verschiedenen anhand der Werte in der Kostentabelle ermittelten Kosteninformationen zum Windheizung 2.0 Konzept in diagrammatischer Form dargestellt. Neben den Investitions- und jährlichen Energiekosten sind das die Kapitalwerte jeweils mit Bezug zu den des GEG-Referenzgebäudes.

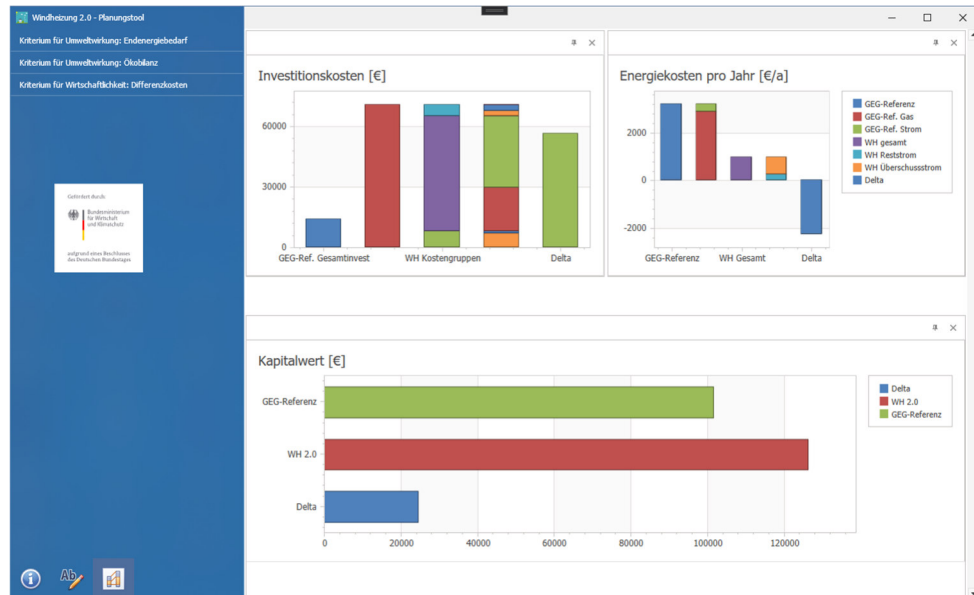


Bild 177:
Ansicht der ökonomischen Auswertung zum konfigurierten Windheizung 2.0-Konzept.

4.4 Kostenaufstellung

Als Grundlage für die Wirtschaftlichkeitsberechnung werden belegbare Ansätze zu den Investitions-, Wartungs- und Energiekosten benötigt. Ein Großteil der benötigten Kosten bzw. Mehrkosten, wie z.B. für höhere Dämmstärken von Außenwänden oder Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung kann aus bestehenden Standardwerken wie z.B. dem Bau-Kosten-Index (BKI) oder den GEG-Wirtschaftlichkeitsberechnungen entnommen werden. Die Kosten für diese Standardkomponenten werden mit Hilfe des Bau-Kosten-Index der Architektenkammer (BKI) auf das Preisniveau 2022 angepasst. Die dort hinterlegten Baukosten können durch die ganzheitliche Dokumentation der Baukosten auf die Übereinstimmung mit den zu bewertenden Kosten für Kostengruppe 3 und 4 gut geprüft werden und daraus die zusätzlich zu ermittelnden Kosten ausgearbeitet werden. Die Kosten für die Windheizung 2.0-Speicherlösungen werden in Zusammenarbeit mit den beteiligten zuständigen Industriepartnern wie folgt angesetzt.

HTSS

Für Stahlbau, Keramikmaterialien und Aufbau wurden 18.700 € benötigt. Für die vereinfacht Mess- und Leistungsregelungselektronik werden zusätzlich 8000 € angesetzt. Mit diesen 26.700 € wird eine Speichermasse von 5 Tonnen realisiert. Somit werden Kosten von 5340 €/to bzw. von 23 €/kWh Speicherkapazität angesetzt.

BTA-Speicher

Für die beiden Decken-BTA-Systeme werden entsprechend der Herstellerabschätzung für die Decken-BTA im Neubau 141 €/m² und für die Decken-BTA im Sanierungsfall 325 €/m² aktiviert Fläche inkl. aktiver Entladung angesetzt. Da die Wand-BTA Lösungen beide der Sanierungslösung ähneln werden hier dieselben Kosten wie für die Sanierungsdecke von 325 €/m² angesetzt.

Wasserbasierter Wärmespeicher (WWS)

Für den Wasserbasierten Wärmespeicher (WWS) werden nach [1] 14 €/kWh angesetzt.

5 Stromnetzbetrachtung und Geschäftsansätze

Im Rahmen der UN-Klimaschutzkonferenz 2015 in Paris (COP21) wurde ein globales Klimaschutzabkommen festgelegt und 2021 im Rahmen der COP26 überprüft und angepasst. Die EU folgt diesen Zielvorgaben und formuliert mit EU Green Deal, Fit for 55 Paket sowie REPowerEU Aktionsplan Maßnahmen für eine nachhaltige EU-Wirtschaft bis 2050. Die Ausgestaltung der nationalen Klimaschutzpolitik Deutschlands, die Energiewende, orientiert sich an diesen Zielvorgaben. Dies führt zu einer Transformation des Energieversorgungssystems. Bedingt durch die politischen Zielvorgaben der Bundesregierung wird der Ausbau Erneuerbarer Energien und somit der Anteil fluktuierender Stromerzeugung aus Wind und Photovoltaik im Stromsystem weiter steigen. Der derzeitige Ausbaupfad der Bundesregierung sieht vor, diesen Anteil bis 2030 auf 80 Prozent zu erhöhen. Das Erreichen dieser Zielvorgaben verlangt die Veränderung des Energieversorgungssystems in Richtung Dekarbonisierung, Effizienzsteigerung sowie einem hohen Anteil Erneuerbarer Energien.

Die von der deutschen Regierung beschlossene Energiewende, hin zu ausschließlich erneuerbaren Energieträgern, hat weitreichende Auswirkungen auf die Struktur der deutschen Energieversorgung. Insbesondere sind die Stromnetze von der Umstellung betroffen. Die Themen Netzsignale, Regelungstechnik, Steuerungsstrategien und Wirtschaftlichkeitsanalysen mit dem Ziel einer ökologischen, ökonomischen und netzdienlichen Integration des Konzepts Windheizung 2.0 in das Stromsystem waren wichtige Themen in diesem Forschungsprojekt.

Im Rahmen der Transformation des Energiesystems ergeben sich zahlreiche Herausforderungen und Chancen. Eine Aufgabe bei der Integration regenerativer Stromerzeuger in das Energiesystem ist die sinnvoll geregelte Abnahme erneuerbarer Strommengen in Zeiten hoher Einspeisung.

Der Strombezug der Technologie Windheizung 2.0 erfolgt weitgehend flexibel und unabhängig von der Wärmebereitstellung für den Bewohner. Die zeitliche Entkopplung zwischen der thermischen Systembelastung mit elektrischer Energie (Power-to-Heat) und der Bereitstellung von Wärmeenergie im Gebäude ermöglicht eine hohe Flexibilität für das Stromsystem unter Einhaltung von Komfortkriterien des Endverbrauchers.

5.1 Definition von Einsatzbereichen des Systems Windheizung 2.0

Die Technologie Windheizung 2.0 stellt eine Flexibilitätsoption für das aktuelle Stromsystem dar. Flexibilität wird vom Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft (BDEW) verschiedenen Einsatzoptionen zugeordnet [24].



Bild 178:
Definition der Einsatzoptionen einer Flexibilität.

Flexibilität beschreibt im Kontext des Betriebsverhaltens des Konzepts Windheizung 2.0 die Anpassung des Strombezugsverhaltens auf Anforderung. Diese Anforderung kann von verschiedenen Marktakteuren erfolgen. Es werden gemäß Bild 178 die folgenden Einsatzbereiche einer Flexibilitätsoption, wie sie die Technologie Windheizung 2.0 darstellt, beschrieben.

Kundendienlicher Einsatz: Betrieb in benutzerdefiniertem Komfort-Temperaturkorridor des Kunden (Gebäudenutzer). Der Kunde besitzt die Schalthoheit über das System Windheizung 2.0. Zusätzlich besteht die Möglichkeit das System mit einem, von einem Algorithmus vorgeschlagenen Fahrplan, zu betreiben.

Marktdienlicher Einsatz: Einsatz der Flexibilitätsoption für die Portfoliooptimierung von Angebot und Nachfrage eines Bilanzkreisverantwortlichen (BKV). Die Technologie Windheizung 2.0 findet Anwendung für die Reduzierung von Ausgleichsenergiemengen und somit bei der vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) [25] geforderten Schärfung der Bilanzkreistreue eines BKV.

Netzdienlicher Einsatz: Betrieb und Partizipation der Windheizung 2.0 zur Vermeidung lokaler, netzbedingter Engpasssituationen. Anwendung findet das Konzept der Netzampel [24] für die Identifikation von relevanten Netzengpass-situation sowie für die Evaluation des netzdienlichen Einsatzes der Technologie Windheizung 2.0.

Systemdienlicher Einsatz: Einsatz von Flexibilität für den bilanziellen, nicht orts-gebundenen Ausgleich von Angebot und Nachfrage [26]. Dies dient dem Erhalt der Systemstabilität in der gesamten Regelzone. In Deutschland existieren vier Regelzonen, welche zum Netzregelverbund zusammengeführt und ausgeglichen werden.

5.2 Darstellung regulatorischer Rahmenbedingungen

Das System Windheizung 2.0 zeichnet sich dadurch aus, dass ein Lastverschiebungspotenzial für einen Zeitraum von ein bis zwei Wochen realisiert wird. Dies wird durch eine Kombination eines möglichst hohen Effizienzstandards des Gebäudes in Kombination mit einem geeigneten Wärmespeicher und intelligenter Regelung ermöglicht. Dadurch kann das System Windheizung 2.0 den Anforderungen des zukünftigen Stromsystems gerecht werden. Die erhöhte Einspeisung aus fluktuierenden erneuerbaren Energieträgern fordert eine Stromabnahme bevorzugt zu Zeiten, in denen ein hoher Anteil Strom aus erneuerbaren Energien und gleichzeitig Transportkapazitäten des Stromnetzes vorhanden sind.

Das System Windheizung 2.0 trägt a) zu einer Systemstabilität bei durch eine hohe Stromabnahme bei einer hohen Einspeisung aus Erneuerbaren Energien und freien Leitungskapazitäten und b) ermöglicht das hohe Lastverschiebungspotenzial einen Verzicht auf die Stromabnahme zu Zeiten eines Leitungsengpasses und/oder wenig Einspeisung von Erneuerbaren Energien. Diese Flexibilität, welche zur Stabilisierung des Stromnetzes beiträgt, soll von Seiten der Politik mit flexiblen Strompreisen belohnt werden. Realisierbar wäre dies beispielsweise durch eine Verknüpfung der Strompreise für den Nutzer des Systems Windheizung 2.0 mit den Preisen für Stromkontrakte der EPEX SPOT bei gleichzeitiger Flexibilisierung bzw. Reduktion von Abgaben, Umlagen und Steuern.

Die Untersuchungen und Ergebnissen aus diesem Projekt sollen der Politik die notwendigen fachlichen Grundlagen und Begründungen liefern, dass eine Flexibilisierung der Abgaben und Umlagen und damit auch der Strompreise eine notwendige und zielführende Maßnahme ist, um Angebot und Nachfrage im Strommarkt zusammenzuführen und Stromleitungskapazitäten optimal zu nutzen. Die in diesem Projekt gewonnenen Erkenntnisse sind auch eine wichtige Grundlage für die anstehende und notwendige systemverträgliche Integration der Elektromobilität, von Wärmepumpen und die für deren flexiblen Strombezug notwendigen Rahmenbedingungen.

Vor dem Hintergrund der eingeleiteten Umgestaltung des Energieversorgungssystems hin zu einem System mit einem hohen Anteil Erneuerbarer Energien, gewinnt die Systemintegration schwankender Stromerzeugung zunehmende Bedeutung. Daraus folgt, dass die Notwendigkeit der Nutzung vorhandener Flexibilitätsoptionen stetig zunehmen wird, damit die Versorgungssicherheit und damit die Akzeptanz für die Energiewende in der Bevölkerung weiterhin in hohem Maße gewährleistet ist [27] und [28].

Grundlagen des Strommarktes

Der europäische Strommarkt folgt einer hierarchischen Ordnung und wird von dem European Network of Transmission System Operators for Electricity (ENTSO-E) organisiert. Das ENTSO-E ist ein Netzwerk von 39 europäischen Übertragungsnetzbetreibern (ÜNB) aus 35 Ländern. Es organisiert den Betrieb des europäischen Stromsystems und teilt es in Regelzonen auf.

Den Betrieb sowie die Sicherheit der jeweiligen Regelzone übernimmt der zugehörige ÜNB. In Deutschland gibt es vier Regelzonen, welche den ÜNB TenneT TSO, Amprion, 50Hertz Transmission und TransnetBW zugeordnet sind.

Innerhalb der Regelzonen werden Bilanzkreise gebildet. Bilanzkreise sind virtuelle Gruppen in denen Marktteilnehmer (Erzeuger und Verbraucher) zusammengefasst werden. Jeder Bilanzkreis wird von einem BKV organisiert. Der BKV ist gegenüber dem ÜNB verpflichtet, für den Ausgleich zwischen dem Aufbringen und der Abgabe elektrischer Energie innerhalb des Bilanzkreises zu sorgen. Rechnung getragen wird dieser Forderung mittels Bezugs- und Lieferfahrplänen, welche der BKV auf Prognosebasis erstellt und dem ÜNB übermittelt.

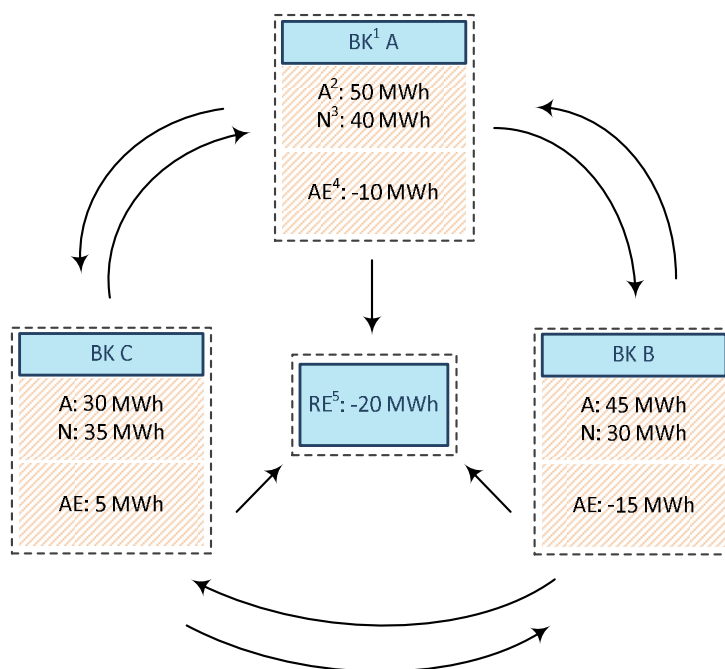
Basierend auf dem schwankenden Erzeugungscharakter von Windenergie- und PV-Anlagen sowie dem stochastischen Strombezugsverhalten von Lastprofilkunden und der damit einhergehenden Unschärfe in den Erzeugungs- und Bezugsprognosen, ist es nicht möglich, die Stromeinspeisung und -entnahme exakt zu bilanzieren. Auf der Bilanzkreisebene führt dies zu Fahrplanabweichungen gegenüber den prognosebasierten Anmeldungen des Vortages. BKV sind verpflichtet, ihren Bilanzkreis auf Viertelstundenbasis im Gleichgewicht zu halten. Ebenso fordert das BMWi eine Schärfung der Bilanzkreistreue. [25] Prognoseabweichungen können über den Handel am Day-Ahead und Intraday Markt ausgeglichen werden. Differenzen, die an diesen Märkten nicht gehandelt werden können, werden im Rahmen der Abrechnung für Ausgleichsenergie verrechnet. Damit einhergehend ergeben sich schwer kalkulierbare Ausgleichsenergiekosten für BKV.

Die Zunahme volatiler Erzeugungseinheiten auf Bilanzkreisebene fordert die Erweiterung des Geschäftsfeldes der einzelnen Marktakteure, um der Forderung nach Bilanzkreistreue und damit verbunden der Reduzierung von Ausgleichsenergiekosten sowie dem resultierenden wirtschaftlichen Risiko Rechnung zu tragen.

Neben der Organisation der Bilanzkreise innerhalb ihrer Regelzone haben die ÜNB die Verantwortung für die Gewährleistung der Systemstabilität des Stromnetzes. Dem wird mit der Aufrechterhaltung des Gleichgewichtes zwischen Stromangebot und -nachfrage Rechnung getragen. Innerhalb einer jeden Regelzone muss die Summe der Abweichungen sämtlicher Bilanzkreise über den Einsatz von kurzfristig verfügbarer Leistungsreserve, sog. Regelleistung, ausgeglichen werden.

Die Summe der Ausgleichsenergiemengen einer jeden Viertelstunde innerhalb einer Regelzone ergibt den Bedarf abzurufender Regelleistung. Diese wird vom ÜNB der zugehörigen Regelzone vorgehalten. Mit dem Abruf der Regelleistung werden die Mehr- oder Mindermengen an elektrischer Energie im Stromnetz ausgeregelt, um die Stabilität des Stromsystems aufrecht zu halten.

Die Summe der Ausgleichsenergie innerhalb einer Regelzone kann den Regelleistungsbedarf um ein Vielfaches überschreiten, da Bilanzkreise sich physisch untereinander ausgleichen. Bild 179 veranschaulicht die Interaktion von drei exemplarischen Bilanzkreisen innerhalb einer Regelzone, die Verteilung der Ausgleichsenergiemengen sowie den resultierenden Regelenergiebedarf.



¹ Bilanzkreis

² Angebot elektrischer Energie

³ Nachfrage elektrischer Energie

⁴ Ausgleichsenergie; Berechnung: $AE = N - A$ (Verbraucherzählpeilsystem)

⁵ Regelenergie; Berechnung: $(-10 - 15 + 5) \text{ MWh} = -20 \text{ MWh}$

Bild 179:
Bilanzkreise und ihre Ausgleichsenergiemengen mit resultierendem Regelenergiebedarf.

Drei exemplarische Bilanzkreise mit zugehörigem elektrischem Angebot sowie elektrischer Nachfrage sind in Bild 179 aufgeführt. Bilanzkreise bilden die Grundlage für die Bilanzierung jeglicher Stromhandelsaktivitäten der BKV innerhalb einer Regelzone. Jeder BKV ist vertraglich verpflichtet, seinem zugehörigen ÜNB für seinen Bilanzkreis einen ausgeglichenen Fahrplan für jede Viertelstunde des Jahres zu liefern. Diese Aufgabe nimmt ein BKV im Rahmen seiner Tätigkeit des Bilanzkreismanagements wahr.

Bilanzkreismanagement

In Bild 180 werden die Komponenten eines Bilanzkreismanagements in zeitlicher Reihenfolge mit Zuordnung der Handlungsoptionen auf dem deutschen Strommarkt aufgeführt. Des Weiteren werden die zeitlichen Rahmenbedingungen für die Fahrplananmeldung in Deutschland mit Hilfe des ENTSO-E Scheduling Systems (ESS) [29] dargestellt.

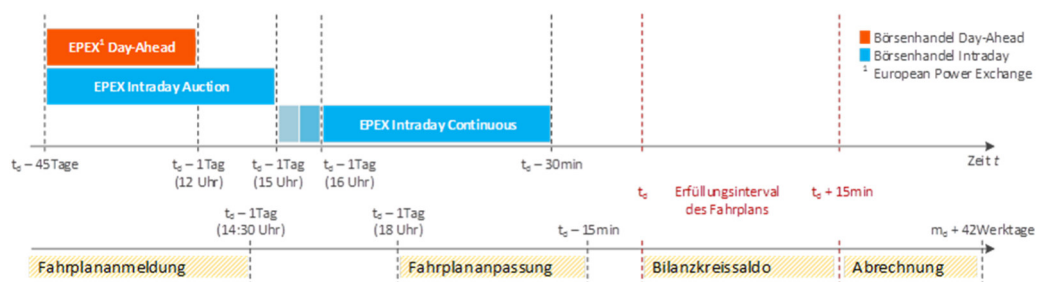


Bild 180:

Zeitliche Vorgaben des ENTSO-E Scheduling Systems sowie der European Power Exchange für verschiedene Handelsprodukte.

Wesentliche Erkenntnis zum aktuellen Strommarktdesign, welches sich in der Realisierung des Bilanzkreismanagements wiederfindet, ist die zeitliche Vorlaufzeit der a) Handelsaktivitäten sowie der b) Fahrplananpassungen des BKV beim ÜNB für jedes 15 Minuten-Erfüllungsintervall des Fahrplans.

5.3 Entwicklung eines Simulationsmodells zur mehrkriteriellen Betriebsoptimierung von Flexibilitätsoptionen mittels Schaltvorschlägen in Form von Fahrplänen

In diesem Abschnitt wird ein Simulationsmodell zur mehrkriteriellen Betriebsoptimierung von Flexibilitätsoptionen, basierend auf der Abbildung regulatorischer und technischer Rahmenbedingungen, entwickelt.

Das Schnittstellenkonzept zur Darstellung von Modulen des Simulationsmodells und ihren Verknüpfungen wird in Bild 181 dargestellt. Wetter- und Geodaten bilden Informationen für Stromnetz-, Strommarkt-, Nutzer- sowie Fahrplan-Modul. Stammdaten für die Beschreibung von Szenarien, bspw. Betriebsmitteldaten technischer Einheiten, sowie Bewegungsdaten, bspw. Prognosen der Einspeiseleistung von Windenergieanlagen, werden in der Datenbank vorgehalten.

Module können deaktiviert und durch externe Informationsquellen und -senken substituiert werden. Ein Anwendungsbeispiel ist die Deaktivierung des Nutzer-Moduls. Das entsprechende Substitut kann bspw. ein Gebäude mit Energiemanagementsystem als Informationssenke für netz- und marktdienlich optimierte Schalterempfehlungen in Form von Fahrplänen sein.

Anwendung findet das Simulationsmodell auf vordefinierte Szenarien für Feldversuche mit realen nichtbewohnten Wohngebäuden des Fraunhofer IBP.

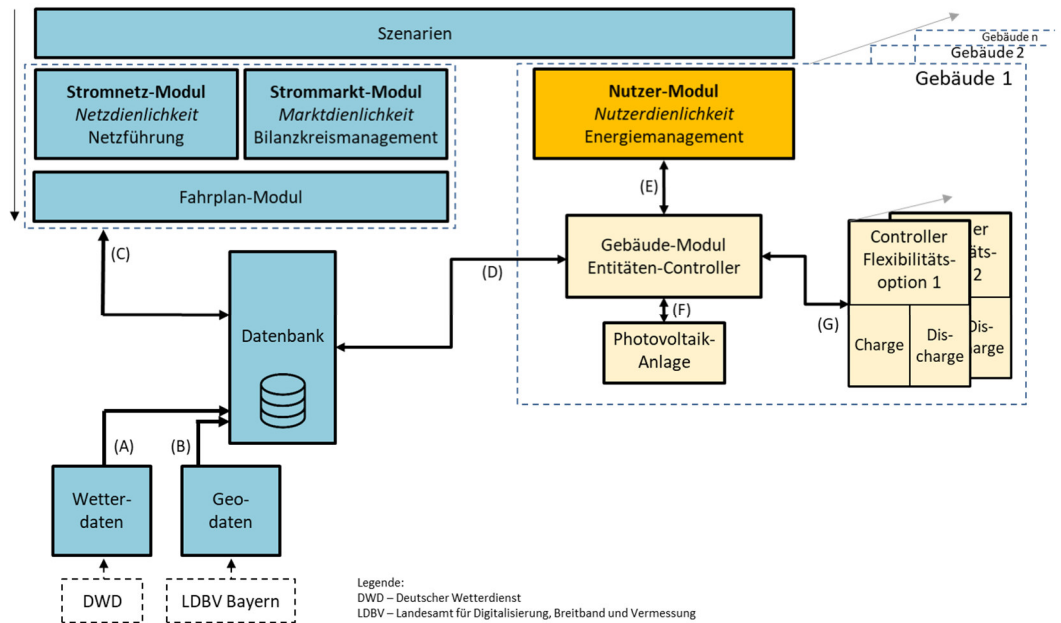


Bild 181: Schnittstellenkonzept des Simulationsmodells für die Erzeugung und Bereitstellung markt- und netzdienlicher Schaltvorschlüsse für Flexibilitätsoptionen.

5.3.1 Bewegungsdaten

Meteorologische Prognosedaten

Die Erzeugung wetterabhängiger Bewegungsdaten verlangt die Erweiterung des Simulationsmodells. Es werden Rahmenbedingungen wie die Verfügbarkeit von Wetterprognosedaten für die Fahrplanerstellung in das Simulationsmodell implementiert. Ebenso wird die Fähigkeit der Integration historischer Ergebnisse der Prognosemodelle ICON, ICON-EU und Cosmo-D2 des Deutschen Wetterdienstes (DWD) hinzugefügt. Dies ermöglicht gemäß Bild 182 einen Prognosezeitraum von bis zu 180 h.

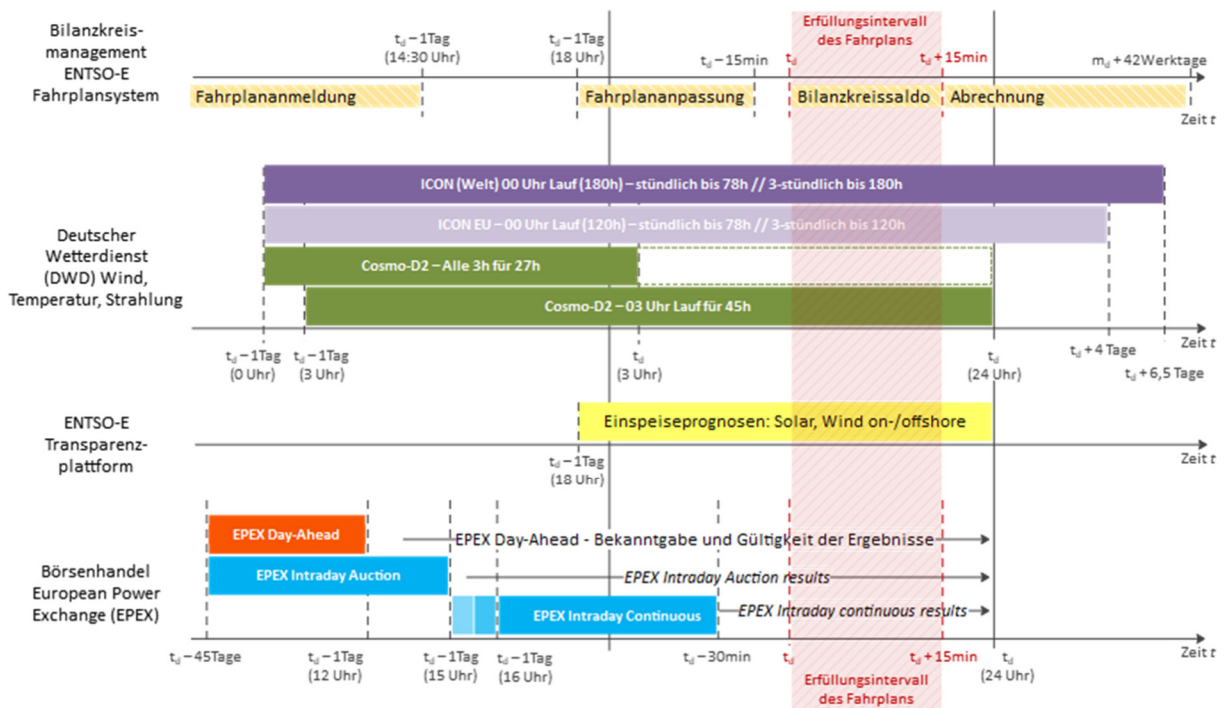


Bild 182:

Zeitliche Vorgaben des ENTSO-E Fahrplansystems, der Prognosemodelle ICON, ICON-EU und COSMO-D2 des Deutschen Wetterdienstes, der ENTSO-E Transparenzplattform sowie der European Power Exchange für verschiedene Handelsprodukte.

Die Wettervorhersagemodelle ICON und ICON-EU des DWD bieten gegenüber dem Cosmo-D2 Modell größere Prognosezeiträume bei gleichzeitiger größerer Auflösung in Raum und Zeit. Bedingt durch diesen Sachverhalt werden zu jedem Zeitpunkt stets die aktuellen Modellergebnisse mit der detailliertesten Auflösung in Raum und Zeit verwendet. Dies resultiert in einer Überlagerung der drei Prognosemodelle ICON, ICON-EU und Cosmo-D2 gemäß Bild 183.

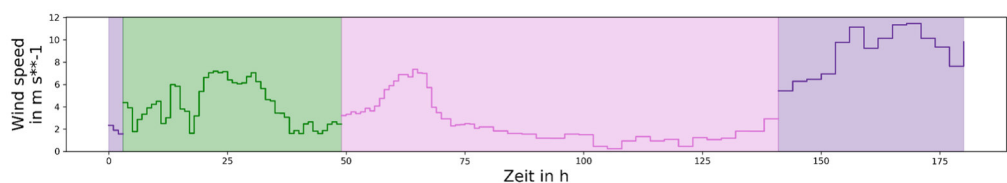


Bild 183:

Ergebnisse der Prognosemodelle COSMO-D2, ICON-EU und ICON des Deutschen Wetterdienstes zur Windgeschwindigkeit im betrachteten Netzgebiet für das Datum 01.12.2019 06:00 Uhr. Grüner Bereich: Cosmo-D2; Pinker Bereich: ICON-EU; Lila Bereich: ICON.

Anwendung finden die Prognosedaten des DWD bei der Bestimmung netz- und marktdienlicher Kriterien für mehrkriterielle Schaltvorschläge zum Betrieb der Flexibilitätsoption Windheizung 2.0 im Cosmo-D2 Modellgebiet gemäß Bild 184.

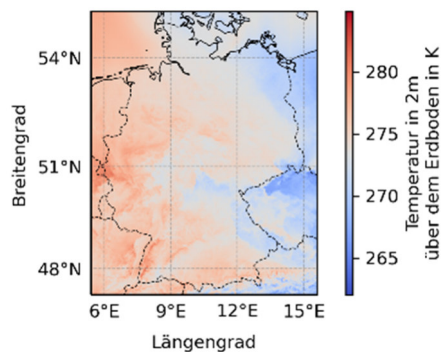


Bild 184:
Modellgebietsausschnitt des numerischen Wettervorhersagemodells Cosmo-D2 des Deutschen Wetterdienstes.

Meteorologische Messdaten

Das Simulationsmodell wird um die online-fähige Integration historischer Messdaten der über das Bundesgebiet verteilten Wetterstationen des DWD erweitert. Messdaten der 301 Messstationen für die Erfassung von Windgeschwindigkeit und -richtung sowie 325 Messstationen für diffuse solare und globale Strahlung werden täglich abgerufen sowie gespeichert und können vom Simulationsmodell verarbeitet werden.

5.3.2 Stammdaten

Die Bereitstellung und Verwendung von Stammdaten verlangen die Erweiterung des Simulationsmodells. Es werden weitere Rahmenbedingungen und Inhalte wie spezifische Informationen technischer Einheiten (Stromerzeugungsanlagen) aus dem Marktstammdatenregister der Bundesnetzagentur [30] sowie Geoinformationen des individuell betrachteten Netzgebietes für die Fahrplanerstellung in das Simulationsmodell implementiert.

Stromerzeugungsanlagen

Die räumliche sowie zeitliche Darstellung des Kraftwerksparkes deutscher on-/off-shore Windenergieanlagen sowie Photovoltaik-Anlagen erfolgt auf Basis ortsscharfer Stammdaten der energieträgerspezifischen Stromerzeugungseinheiten des Marktstammdatenregisters der Bundesnetzagentur [30].

Extrahierte Merkmale individueller Einheiten beschreiben Nenn-/Peakleistung, Koordinaten, Inbetriebnahmedatum sowie das Datum der Stilllegung und ermöglichen eine Darstellung räumlich verteilter Leistungskapazitäten von Windenergie- und Photovoltaik-Anlagen in täglicher Auflösung, siehe Bild 185.

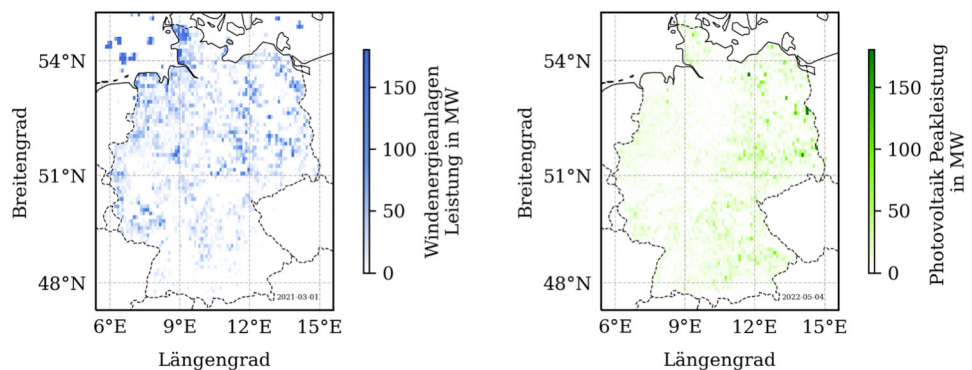


Bild 185:

Ortscharfe Nennleistung der deutschen on-/offshore Windenergieanlagen (links) sowie Photovoltaik-Anlagen (rechts) auf Basis des Marktstammdatenregisters der Bundesnetzagentur [30].

Stammdaten technischer Einheiten individueller Stromnetzmodelle, bspw. eines betrachteten Mittelspannungsnetzes im Gebiet des Netzbetreibers LVN, bilden eine zusätzliche Informationsquelle und werden dem Simulationsmodell für die Bildung von Bewegungsdaten zur Verfügung gestellt.

Geoinformationen

Georeferenzierte Stammdaten dienen der Berechnung netzdienlicher Schaltvorschläge für den Betrieb der Flexibilitätsoption Windheizung 2.0. Wesentliche Anwendung finden georeferenzierte Informationen von Netzanschlusspunkten gemäß Bild 186 in der Erzeugung von Bewegungsdaten wie sie Zeitcharakteristiken der Netzaustauschleistungen von Ortsnetzstationen darstellen. Darüber hinaus ermöglichen sie die Abschätzung des Einspeisepotenzials von Photovoltaik-Anlagen eines Netzgebietes.

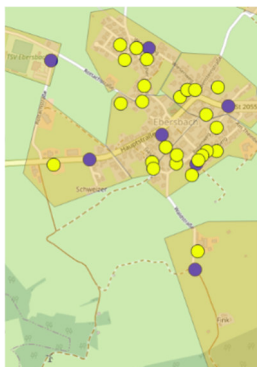


Bild 186:
Georeferenzierte Netzanschlusspunkte eines Dorfes. Blaue Punkte: Ortsnetzstationen; Gelbe Punkte: Photovoltaik-Anlagen; Graue Polygone: Gebäude; Grüne Polygone: Versorgungsgebiet einer Ortsnetzstation; Im Süden: Windkraftanlage.

Im Simulationsmodell angewandte georeferenzierte Informationen von Netzanschlusspunkten werden um Informationen des bayerischen 3D-Gebäudemodells (Level of Detail 2, kurz: LOD2), bereitgestellt vom LDBV Bayern, erweitert. Dies beinhaltet die Detaillierung von Gebäudeinformationen um Dachorientierung und -neigung. Diese Informationen sind Bestandteil bei der Bildung adressscharfer Bewegungsdaten nach [31], [32] und [33], wie sie Zeitcharakteristiken der Netzaustauschleistung von Netzanschlussnehmern mit PV-Anlagen gemäß Bild 186 darstellen.

Stehen detaillierte Daten eines 3D-Gebäudemodells mit Angaben zu Dachneigung und -orientierung nicht zur Verfügung mindert dies die Prognosegüte der Zeitcharakteristiken der PV-Stromerzeugung von Netzanschlussnehmern mit PV-Anlagen. Diesem Sachverhalt wird Rechnung getragen, indem das Simulationsmodell um Informationen von digitalen Senkrechtaufnahmen der Erdoberfläche, erhoben mittels Light Detecting And Ranging (LiDAR) Messung, erweitert wird. Als Ergebnis einer LiDAR Messung steht eine dreidimensionale Punktwolke zur Verfügung, die zur Bildung eines digitalen Oberflächenmodells und im Weiteren zur Beschreibung von Dachneigung und -orientierung von Netzanschlussnehmern mit PV-Anlage verwendet wird.

Das Simulationsmodell wird dahingehend erweitert, dass adressscharfe Prognosen der Charakteristiken von PV-Stromerzeugungen basierend auf Geoinformationen von a) einem detaillierten 3D-Gebäudemodell oder b) Ergebnissen einer LiDAR Messung in Form eines digitalen Oberflächenmodells realisiert werden können.

5.4 Entwicklung von Schaltvorschlägen in Form von Fahrplänen für die Flexibilitäts- option Windheizung 2.0

Stromnetz-Modul

Der Betrieb und die Bewertung eines netzdienlichen Einsatzes der Technologie Windheizung 2.0 basiert auf der Adressierung kritischer Netzengpasssituationen bzgl. Spannungsbandverletzungen und Auslastungen technischer Betriebsmittel.

Der BDEW definiert Ampelphasen für die differenzierte Betrachtung von Netzzuständen in Stromverteilernetzen. In Abhängigkeit der Stromeinspeisung und -entnahme ergeben sich Netzzustände, welche einer Ampelphase zugeordnet werden. Die grüne Ampelphase repräsentiert unkritische Netzzustände, in denen der Verteilnetzbetreiber (VNB) nicht in den Markt eingreift. Weitere Ampelphasen beschreiben Netzengpasssituationen auf die der VNB reagieren muss. Die gelbe Ampelphase nutzt der VNB für eine marktbasierete Akquise netzdienlicher Flexibilitätsoptionen, wie sie die Technologie Windheizung 2.0 darstellt. In der roten Ampelphase regelt und steuert der VNB außerhalb des Marktes mit direkten Eingriffen in das Stromnetz (Leistungsanpassung von Einspeise- und Verbrauchseinheiten). [24]

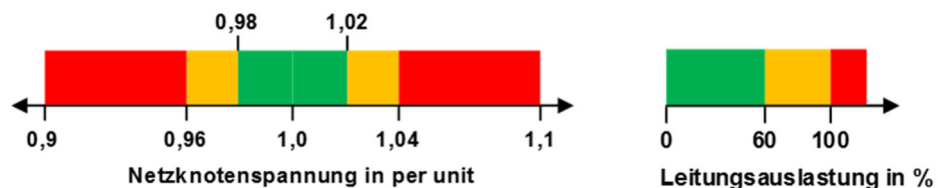


Bild 187:
Interpretation der Netzampel des BDEW (in Anlehnung an [34]).

In Bild 187 werden die Ampelphasen konkreten Netznotenspannungen im „per unit“-System sowie Leitungsauslastungen in Prozent zugeordnet. Die Zuordnung dient der Fahrplanerstellung und Bewertung eines netzdienlichen Einsatzes der Technologie Windheizung 2.0.

Die Stromnetzmodellierung erfolgt mit der Software PowerFactory der Firma DlgSILENT GmbH. Die Methode der symmetrischen Leistungsflussberechnung für Wechselstromnetze dient der Bestimmung netzdienlicher Kriterien (Knotenspannungen, Leitungsauslastungen), welche dem Fahrplan-Modul zur Verfügung gestellt werden.

Abgeleitete Bewegungsdaten

Die Voraussetzung zur Bestimmung von Netzzustandsgrößen für Betriebsmittel und Netzknoten mit Methoden der Leistungsflussberechnung ist die Charakterisierung des elektrischen Wechselstromes mittels P-, Q- oder P-, U-Werten an jedem Knotenpunkt (bspw.: Netzanschlusspunkt eines Niederspannungsnetzes, eines Wohngebäudes, einer PV-Anlage, einer Windenergieanlage) des modellierten Netzgebietes.

Die Simulation eines **detaillierten NS-Netzmodelles** unter der Verwendung von Charakteristiken der elektrischen Wirk- und Blindleistung der detaillierten Netzanschlussnehmer kann auf Basis von Standardlastprofilen oder öffentlich zugänglichen Strombedarfsprofile für Wohngebäude, bspw. der HTW Berlin [35], erfolgen. Des Weiteren können Charakteristiken der Wirk- und Blindleistungseinspeisung von PV-Anlagen im Haushaltsbereich auf Basis der Arbeiten von Perez [31], [32] und [33] gebildet und in die Stromnetzmodellierung integriert werden.

Der Anwendungsfall eines **nicht detaillierten NS-Netzmodelles**, d.h. Aggregation sämtlicher Lasten sowie PV-Anlagen an der unterspannungsseitigen Sammelschiene des Transformators der Ortsnetzstation, bedarf die Bildung und jeweilige Aggregation von Charakteristiken der Wirk- und Blindleistungsentnahme von elektrischen Lasten sowie -einspeisung von PV-Anlagen.

Ohne Messdaten der Ortsnetzstation:

Ein entwickelter Bottom-up Ansatz modelliert das Strombezugsverhalten elektrischer Lasten der Niederspannungsebene via Standardlastprofilen unter Hinzunahme von Zensus Informationen. Des Weiteren werden Stromeinspeisecharakteristiken von PV-Anlagen via Gebäudeinformationen des bayerischen 3D-Gebäudemodells LOD2 des LDBV Bayern und/oder Informationen von digitalen Senkrechtaufnahmen der Erdoberfläche sowie basierend auf den Methoden nach Perez [31], [32] und [33] gebildet.

Mit Messdaten der Ortsnetzstation:

Es wird eine Methodik für die Bildung probabilistischer, datenbasierter Schätzer zur Punkt-Prognose des Wirkleistungsbedarfes von Ortsnetzstationen gemäß Bild 188 entwickelt und in das Simulationsmodell implementiert. Randbedingung ist die ausschließliche Anwendung von Daten mit Verfügbarkeit in einem realen Anwendungsfall. Beschreibende Eingangsgrößen sind historische Wirkleistungsbedarfe der abzubildenden Ortsnetzstation (ONS) sowie öffentlich zugängliche Wetterdaten des DWD.

Maschinelle Lernverfahren in Verbindung mit datenbasierten Metamodellen wie künstlichen neuronalen Netzen, gradientenverstärkten Entscheidungsbäumen und SARIMAX-Modellen (Seasonal autoregressive integrated moving average with exogenous variables; Saisonaler autoregressiver integrierender gleitender Mittelwert mit zusätzlichen exogenen Eingangsgrößen) werden modelliert. In

Abhängigkeit der Datenverfügbarkeit werden die unterschiedlichen Metamodellierungen mit variablen Trainingsintervallen, d.h. bspw. 15 min, 1 h, 24 h sowie mit mono- oder multifaktoriellen Trainingsdaten erzeugt.

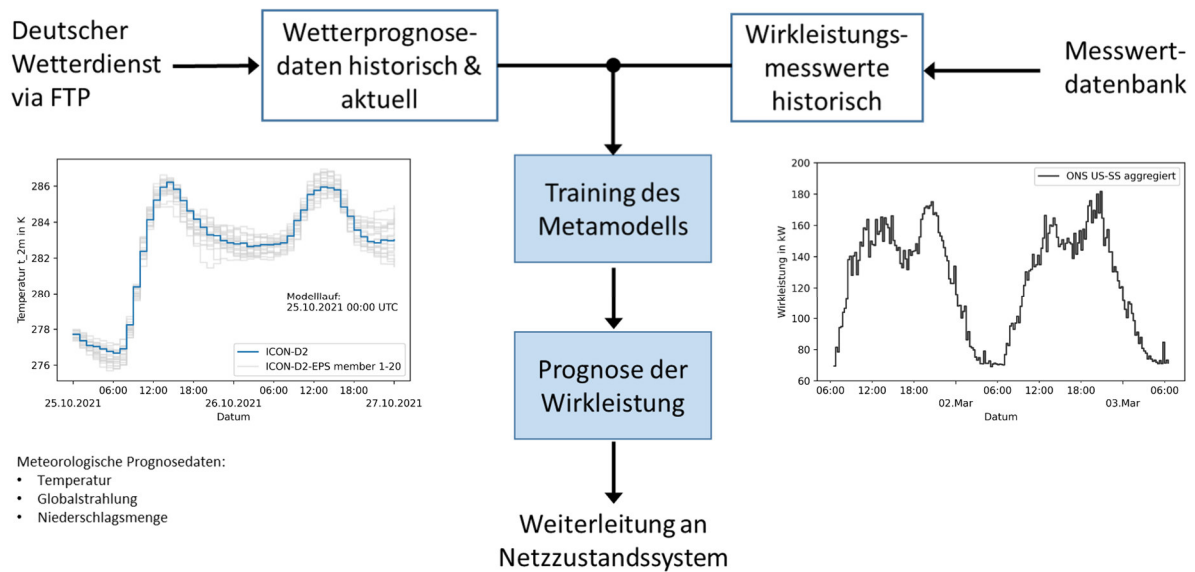
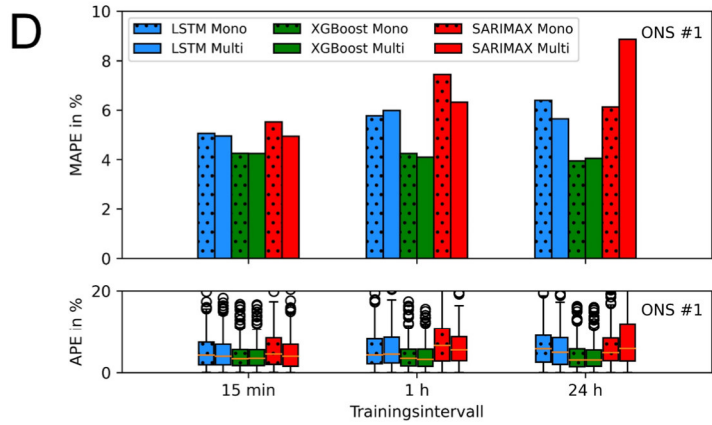
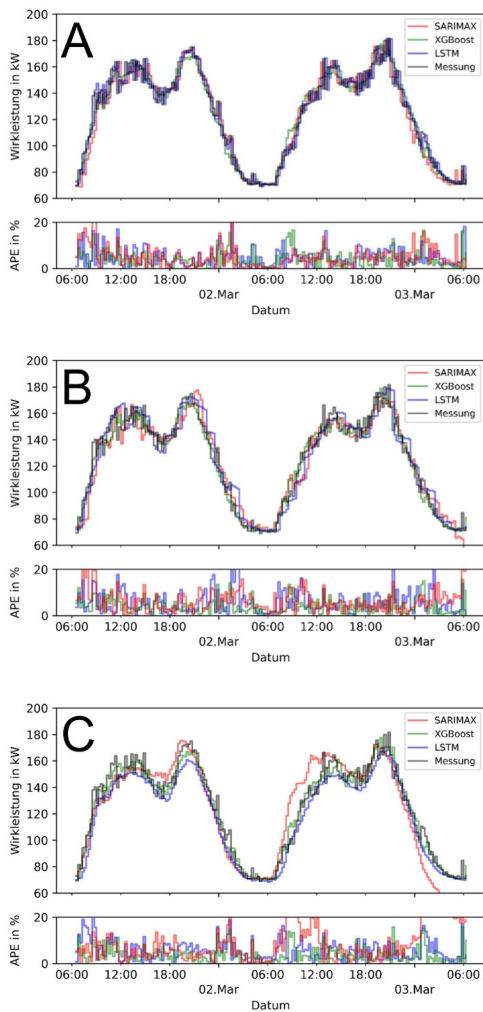


Bild 188: Übersicht der Arbeitsschritte für die Bildung probabilistischer, datenbasierter Schätzer zur Punkt-Prognose des Wirkleistungsbedarfes von Ortsnetzstationen.

Das Verfahren findet Anwendung für die Prognose des Wirkleistungsbedarfes von drei verschiedenen ONS innerhalb einer repräsentativen Woche in der Übergangszeit 2021. Es werden Verläufe der realisierten und prognostizierten Wirkleistungsbedarfe für ONS #1 mit drei Variationen an Trainingsintervallen (A: 15 min, B: 1 h, C: 24 h) in Bild 189A-C dargestellt. Des Weiteren werden Metriken zur Prognosegüte der mono- sowie multifaktoriell trainierten Metamodelle mit drei Trainingsintervallen (A: 15 min, B: 1 h, C: 24 h) für ONS #1 in Bild 189D,E sowie ONS #2,3 in Bild 189F dargestellt.



E

| Eingangsdaten | Trainingsintervall | LSTM ³ | | XGBoost ⁴ | | SARIMAX ⁴ | |
|--------------------|--------------------|-------------------|------|----------------------|------|----------------------|------|
| | | RMSE | MAPE | RMSE | MAPE | RMSE | MAPE |
| Mono ¹ | 15 min | 8.21 | 5.06 | 6.89 | 4.25 | 8.98 | 5.52 |
| | 1 h | 9.57 | 5.77 | 6.94 | 4.24 | 11.67 | 7.44 |
| | 24 h | 10.34 | 6.39 | 6.54 | 3.94 | 9.46 | 6.13 |
| Multi ² | 15 min | 8.13 | 4.95 | 6.89 | 4.24 | 8.27 | 4.98 |
| | 1 h | 9.60 | 5.98 | 6.82 | 4.09 | 9.41 | 6.32 |
| | 24 h | 9.30 | 5.65 | 6.79 | 4.05 | 12.92 | 8.86 |

¹ Messdaten ONS; ² Wie ¹ zzgl. Punkt-Prognosedaten des DWD;

³ On-line learning; ⁴ Off-line learning

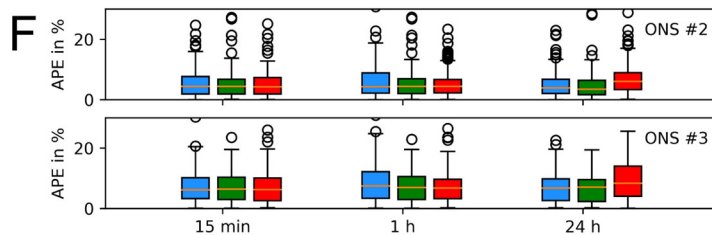


Bild 189:

Prognose des Wirkleistungsbedarfes von drei verschiedenen Ortsnetzstationen. A-C: Realisierte und prognostizierte Charakteristiken des Wirkleistungsbedarfes von drei Ortsnetzstationen. D-F: Metriken für die Darstellung der Prognosegüte von mono- sowie multifaktoriell trainierten Metamodelle mit drei Trainingsintervallen (a: 15 min, b: 1 h, c: 24 h). Metamodelle: LSTM, XGBoost, SARIMAX; Metriken: APE, MAPE, RMSE.

Einspeiseleistung von Windenergie- und PV-Anlagen

Standortspezifische deterministische Schätzer für Punkt-Prognosen der Einspeiseleistungen von Windenergie- und PV-Anlagen werden für a) Windenergieanlagen mittels anlagentypspezifischer Leistungskennlinie (Kennlinienverfahren) und b) PV-Anlagen auf Basis des Perez-Modells [31], [32] und [33] in das Simulationsmodell integriert.

Transregionale probabilistische, datenbasierte Schätzer für Punkt-Prognosen der Einspeiseleistung deutscher on-/offshore Windenergie- und PV-Anlagen am Vormittag des Vortages werden entwickelt und in das Simulationsmodell implementiert. Die zeitliche Verfügbarkeit stellt einen Mehrwert gegenüber öffentlich

zugänglichen Prognosen dar, bspw. bereitgestellt über die ENTSO-E Transparenzplattform am Abend des Vortages, siehe Bild 182. Prognosen am Vormittag des Vortages, dargestellt in Bild 190, bieten einen Informationszuschuss im Rahmen des a) Bilanzkreismanagements gemäß ENTSO-E Fahrplansystem sowie b) der Prognose von EPEX SPOT Day-Ahead Markträumungspreisen vor Auktionsende.

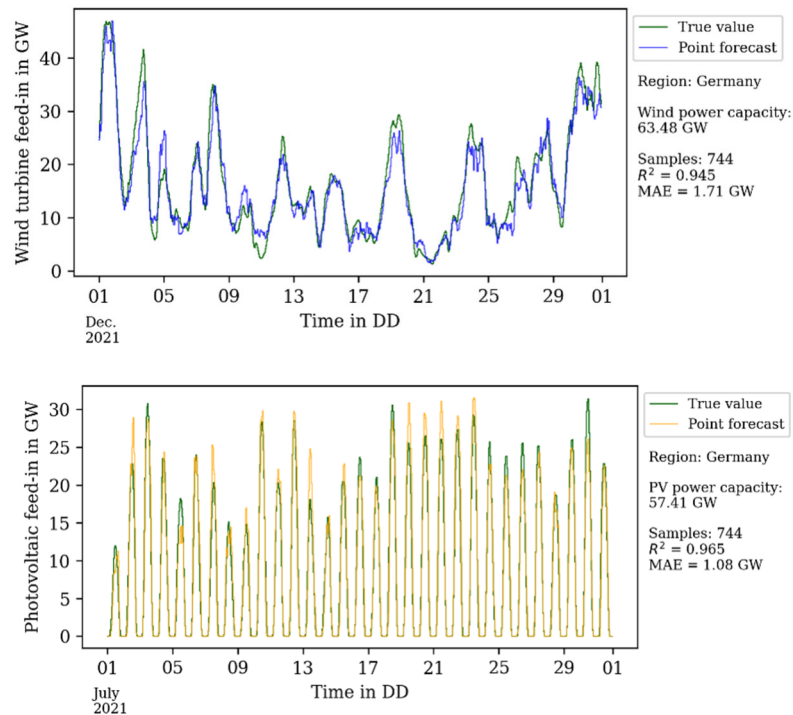


Bild 190: Punkt-Prognosen der Einspeiseleistung deutscher on-/offshore Windenergieanlagen (oben) und Photovoltaik-Anlagen (unten).

Strommarkt-Modul

Der Betrieb und die Bewertung eines marktdienlichen Einsatzes der Technologie Windheizung 2.0 kann auf der Adressierung von Day-Ahead Spotmarktpreisen für Strom und/oder der Reduktion von Ausgleichsenergiemengen basieren.

Die Preisbildung für Strom am vortägigen Spotmarkt sowie der Umfang an Ausgleichsenergiemengen und weitere Merkmale des Stromsystems wie der Saldo des Netzregelverbundes (NRV-Saldo), Regelenergiebedarfe und Netzengpasssituationen sind abhängig von Einspeisemengen deutscher on-/offshore Windenergie- und PV-Anlagen.

Ausgleichsenergiemengen und Netzregelverbund-Saldo

Im Rahmen ihrer Pflichten zur Wahrung der Stabilität und Sicherheit des Stromsystems bilden für Verteilnetz- und Übertragungsnetzbetreiber die Saldi von Bilanzkreisen sowie des Netzregelverbundes wertvolle Informationen für die Ableitung von Handelsentscheidungen, bspw. auf dem Strommarkt. Derartige Aktivitäten für die Reduktion von Fehlpositionen basieren auf Day-Ahead und/oder Intraday Prognosen.

Es werden Daten für die Bildung probabilistischer, datenbasierter Schätzer für die Saldi von Bilanzkreisen sowie des Netzregelverbundes in das Simulationsmodell implementiert. Randbedingung ist die Fähigkeit der Prognose am Vormittag des Vortages sowie die ausschließliche Anwendung von Daten mit Verfügbarkeit in einem realen Anwendungsfall. Beschreibende Eingangsgrößen sind historische Saldi sowie Einspeise- und Bedarfsprognosen für elektrischen Strom.

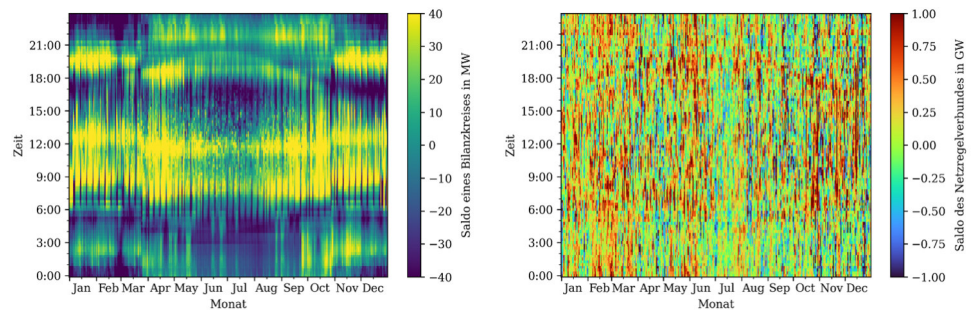


Bild 191:
Realisierte Fehlpositionen im Jahr 2018 eines Bilanzkreises für Standardlastprofilkunden (links) sowie des Netzregelverbundes (rechts).

In den Jahren 2014 – 2018 resultierten im betrachteten Bilanzkreis für Standardlastprofile mind. 3.000 Stunden pro Jahr mit negativem Bilanzkreissaldo. Ebenso resultierten mind. 2.500 Stunden pro Jahr mit negativem Saldo des Netzregelverbundes (Überdeckung). Für das Jahr 2018 kann dieses Verhalten Bild 191 entnommen werden. Einer Überdeckung kann durch Energieabflüsse, bspw. das Aktivieren von Stromabnehmern, entgegengewirkt werden.

EPEX SPOT Day-Ahead Markträumungspreise

Es wird eine Methodik für die Bildung eines probabilistischen, datenbasierten Schätzers für EPEX SPOT Day-Ahead Markträumungspreise der Deutsch-Luxemburgischen Gebotszone (BZN:DE-LU) entwickelt und in das Simulationsmodell implementiert. Randbedingung ist die Fähigkeit der Prognose vor Handelschluss der Day-Ahead Auktion am Vortag (12:00 Uhr, siehe Bild 182), sowie die ausschließliche Anwendung von Daten mit Verfügbarkeit in einen realen Anwendungsfall.

Beschreibende Eingangsgrößen sind historische EPEX SPOT Day-Ahead Markträumungspreise der BZN:DE-LU, Einspeiseprognosen deutscher Windenergie- und PV-Anlagen sowie öffentlich zugängliche Strombedarfsprognosen, Rohstoff- und CO₂-Zertifikatspreise.

Das Anlernen des Schätzers erfolgt über den Zeitbereich des 01.03.2021 3:00 Uhr – 31.05.2021 23:00 Uhr für die Anwendung am Vormittag des 01.06.2021 zur Prognose der Markträumungspreise vom 02.06.2021 0:00 Uhr – 02.06.2021 23:00 Uhr. Der Schätzer wird im täglichen Intervall rollierend mit aktuellen Informationen der beschreibenden Eingangsgrößen angepasst. Des Weiteren wird für den Zweck eines Benchmarks ein naiver Schätzer im täglichen Intervall rollierend erzeugt. Dieser basiert auf der Anwendung der Markträumungspreise des Vortages für die Prognose der Werte des aktuellen Tages.

Ergebnisse einer exemplarischen Aufgabe zur Punkt-Prognose der Markträumungspreise der EPEX SPOT Day-Ahead Auktion der BZN:DE-LU am Vormittag des Vortages über einen Untersuchungszeitraum vom 01.06.2021 0:00 Uhr – 28.12.2021 23:00 Uhr werden von a) einem naiven Schätzer (Benchmark) sowie b) dem probabilistischen ZIES-Schätzer in Bild 192 dargestellt.

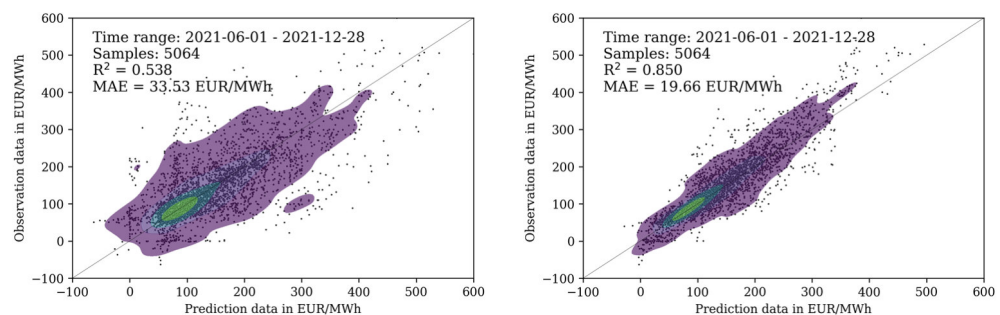


Bild 192: Punkt-Prognose der EPEX SPOT Day-Ahead Markträumungspreise für die Deutsch-Luxemburgische Gebotszone am Vormittag des Vortages über einen Untersuchungszeitraum vom 01.06.2021 0:00 Uhr – 28.12.2021 23:00 Uhr; naiver Schätzer (links) und probabilistischer ZIES-Schätzer (rechts).

Fahrplan-Modul

Die entwickelten Simulationsmodelle für den netzdienlichen und marktdienlichen Einsatz der Flexibilitätsoption Windheizung 2.0 berechnen Schaltvorschläge für unterschiedliche Einsatzbereiche, sog. Kriterien. Im Folgenden werden diese Einsatzbereiche je Kriterium vorgestellt und darauf aufbauend mehrkriteriell zusammengeführt und optimiert.

Das Kriterium des **marktdienlichen Einsatzes** der Flexibilitätsoption beschreibt die Portfoliooptimierung zwischen Angebot und Nachfrage des BKV. Diese Optimierung wird über die Reduzierung der Ausgleichsenergiemengen realisiert, bspw. den Handel von Fehlpositionen über den Stromhandel der EPEX SPOT

oder den Betrieb von Flexibilitätsoptionen wie der Technologie Windheizung 2.0. In Bild 193a werden mögliche Schaltvorschläge zur Reduzierung von Ausgleichsenergiemengen mit einer Flexibilitätsoption mit einem elektrischen Leistungsbedarf von $50 \text{ kW}_{\text{el}}$ für einen Prognosezeitraum von 12 Zeitschritten, d.h. 3 Stunden in einer Auflösung von 15 Minuten, dargestellt.

In diesem Zeitraum können $2^{12} = 4.096$ Variationen von Schaltvorschlägen in Form von Fahrplänen dargestellt werden. Jeder Schaltvorschlag in Form eines Fahrplanes besteht aus einer Variation von 12 Nullen und Einsen. Ein beispielhafter Fahrplan mit der Nummer 2341 beinhaltet Schaltvorschläge der Ausprägung $[1,0,0,1,0,0,1,0,0,1,0,1]$. Schwarze Dreiecke repräsentieren Schaltvorschläge, welche ausschließlich Ausgleichsenergiemengen des Differenzbilanzkreises reduzieren. Hellgraue Quadrate zeigen Schaltvorschläge, welche je 15 min-Block positiv oder negativ auf die Reduzierung von Ausgleichsenergiemengen wirken. Dunkelgraue Kreise zeigen Schaltvorschläge die mit jeder Betriebsempfehlung der Flexibilitätsoption Windheizung 2.0 Ausgleichsenergiemengen erhöhen. Ein Optimum im Sinne einer Portfoliooptimierung für die Reduzierung von Ausgleichsenergiemengen wird mit einem Fahrplan realisiert. Dieser Fahrplan entspricht den prognostizierten 15 min Blöcken mit negativen Ausgleichsenergiemengen im Differenzbilanzkreis des BKV.

Das Kriterium des **netzdienlichen Einsatzes** der Flexibilitätsoption beschreibt die Vermeidung lokaler netzbedingter Engpasssituationen. Diese Optimierung wird über die Steigerung der Betriebszeiten der Flexibilitätsoption innerhalb Gelbphasen mit einer Spannungserhöhung realisiert. Schaltvorschläge die Netzzustandsgrößen negativ beeinflussen und Netzengpasssituationen verschärfen werden verworfen.

In Bild 193b werden mögliche Schaltvorschläge zur Erhöhung der Einsatzzeiten mit netzdienlicher Ampelphase für einen exemplarischer Prognosezeitraum von 3 Stunden in einer Auflösung von 15 Minuten dargestellt. Gelbe Kreise repräsentieren Schaltvorschläge, welche mindestens einen 15 min-Block mit Spannungserhöhung und gelber Ampelphase beinhalten. Grüne Kreise zeigen Schaltvorschläge, welche ausschließlich grüne Ampelphasen ansprechen. Ein Optimum im Sinne einer hohen Anzahl an netzdienlichen Einsatzzeiten kann mit mehreren Fahrplänen realisiert werden. Diese Fahrpläne entsprechen den prognostizierten 15 min Blöcken mit gelben Ampelphasen mit Spannungserhöhungen und grünen Ampelphasen.

Das **Zusammenführen der Kriterien** netzdienlicher (siehe Bild 193a) und marktdienlicher (siehe Bild 193b) Kriterien für den Einsatz der Flexibilitätsoption Windheizung 2.0 führt zu einem mehrkriteriellen Optimierungsproblem. In Bild 193c sind Schaltvorschläge nach den genannten Kriterien dargestellt. Der Entscheidungsträger hat die Freiheit einen Kompromiss zwischen den Optima der Kriterien (grüner Bereich) zu wählen.

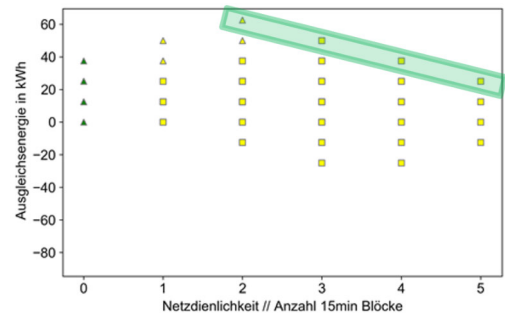
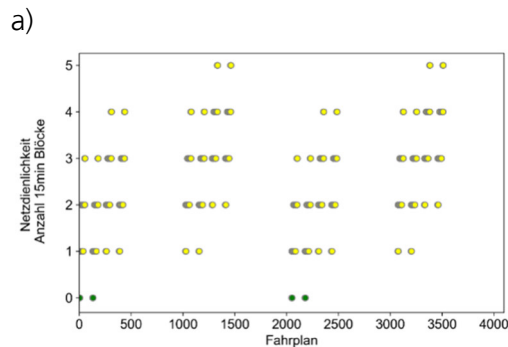
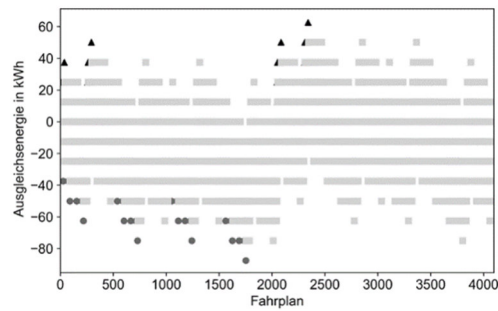


Bild 193:

Methodik für die Anwendung der Kriterien a) Ausgleichsenergiemengenreduktion (Marktdienstlichkeit) und b) Netzampelphasen (Netzdienstlichkeit) zur c) Erzeugung mehrkriterieller Schaltvorschläge.

a) Schaltvorschläge für eine Reduzierung von Ausgleichsenergiemengen für einen Prognosezeitraum von 3 Stunden in einer Auflösung von 15 Minuten.

(Schwarze Dreiecke: Ausschließlich Ausgleichsenergiemengen reduzierend; Hell-graue Quadrate: Ausgleichsenergiemengen reduzierend; Dunkelgraue Kreise: Ausschließlich Ausgleichsenergiemengen erhöhend).

b) Schaltvorschläge für einen Einsatz innerhalb netzdienlicher Ampelphasen für einen Prognosezeitraum von 3 Stunden in einer Auflösung von 15 Minuten.

(Gelbe Kreise: Mindestens ein 15 min-Block mit gelber Ampelphase; Grüne Kreise: Ausschließlich grüne Ampelphasen).

c) Mehrkriterielle Schaltvorschläge und zugehörige Pareto-Optima (grüner Bereich) für einen markt- und netzdienlichen Einsatz für einen Prognosezeitraum von 3 Stunden in einer Auflösung von 15 Minuten (Dreiecke: Ausschließlich Ausgleichsenergiemengen reduzierend; Quadrate: Ausgleichsenergiemengen reduzierend; Gelb: Mindestens ein 15 min-Block mit gelber Ampelphase; Grün: Ausschließlich grüne Ampelphasen).

Die Methodik zur mehrkriteriellen Optimierung von Schaltvorschlägen ist erweiterbar um zusätzliche Dimensionen. Ökologische Kriterien wie die Prognose des CO₂-Fußabdruckes des deutschen Strommixes oder der Einspeiseleistung deutscher Windenergie- und PV-Anlagen oder ökonomische Kriterien wie die Prognose der Markträumungspreise der Day-Ahead Auktion für die Deutsch-Luxemburgische Gebotszone am Vortag vor Handelsschluss.

5.5 Anwendung des Simulationsmodells im Rahmen von Feldversuchen

Die in Kap. 5.3 und 5.4 vorgestellten Methoden und entwickelten Software-Module werden durch den Einsatz des Simulationsmodells auf vordefinierte Szenarien angewendet.

Als **szenarioübergreifende Aufgabe** wird die Bereitstellung mehrkriteriell optimierter Schaltvorschläge für den Betrieb der Flexibilitätsoption Windheizung 2.0 im Rahmen von Feldversuchen mit unbewohnten Zwillingshäusern des Fraunhofer IBP unter Annahme eines räumlichen Betrachtungsbereiches eines Netzgebietes der Lechwerke Verteilnetz GmbH (LVN), gemäß Bild 194, definiert.

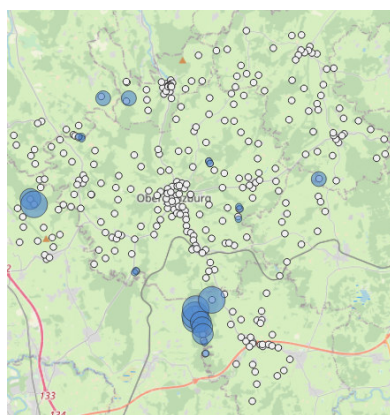


Bild 194:
Georeferenzierte Betriebsmittel eines Mittelspannungsnetzes der Lechwerke Verteilnetz GmbH um das Umspannwerk Obergünzburg, Bayern. Blaue Punkte: Windkraftanlagen (Radius proportional Nennleistung); Weiße Punkte: Ortsnetzstationen

Das **marktdienliche Kriterium** wird über die Adressierung von Preisen für stündliche Stromkontrakte des Day-Ahead Handels der EPEX SPOT für die Deutsch-Luxemburgische Gebotszone realisiert.

Das **netzdienliche Kriterium** beschreibt die Adressierung von simulativen Netzengpassituationen über die Systematik der Netzampel. Es erfolgt die Modellierung von und Simulation mit Charakteristiken der Einspeise- und Entnahmeleistungen für Betriebsmittel und Knotenpunkte des Stromnetzmodells des betrachteten Netzgebietes für den beschriebenen Zeitraum mit einer Auflösung von 15 Minuten. Die Abbildung des Netzgebietes umfasst eine 20 kV Mittelspannungsebene, über welche die folgenden technischen Einheiten verbunden werden:

- 24 Windkraftanlagen
- 326 MS/NS Transformatoren
- 286 aggregierte NS-Lasten. Diese beschreiben rund 17.100 Gebäude.
- 252 aggregierte PV-Anlagen der NS-Ebene. Diese beschreiben rund 2.770 PV-Anlagen.

An **zwei Szenarien** wird die Flexibilitätsoption Windheizung 2.0 in Form von Feldversuchen erprobt. Es erfolgt

1. der Betrieb über eine Zeitspanne von drei Wochen innerhalb der Heizperiode 2020/2021 (01.12.2020 – 21.12.2020) mit historischen Prognosedaten des DWD und EPEX SPOT Day-Ahead Markträumungspreisen, jeweils für den zeitlichen Betrachtungsbereich 01.12.2019 – 21.12.2019 sowie
2. der Betrieb über ein Jahr vom 01.06.2021 – 31.05.2022 mit Messdaten des DWD sowie EPEX SPOT Day-Ahead Markträumungspreisen jeweils für den zeitlichen Betrachtungsbereich 01.06.2019 – 31.05.2020.

Das Schnittstellenkonzept gemäß Kapitel 5.3 Bild 181 wird zur Darstellung des Lösungsansatzes für Szenario übergreifende Aufgaben erweitert, siehe Bild 195. Komponenten der Projektpartner tekmar und Fraunhofer IBP werden eingepflegt und das Zusammenspiel der Parteien für den Betrieb der Flexibilitätsoption Windheizung 2.0 im Rahmen von Feldversuchen gemäß Bild 195 realisiert.

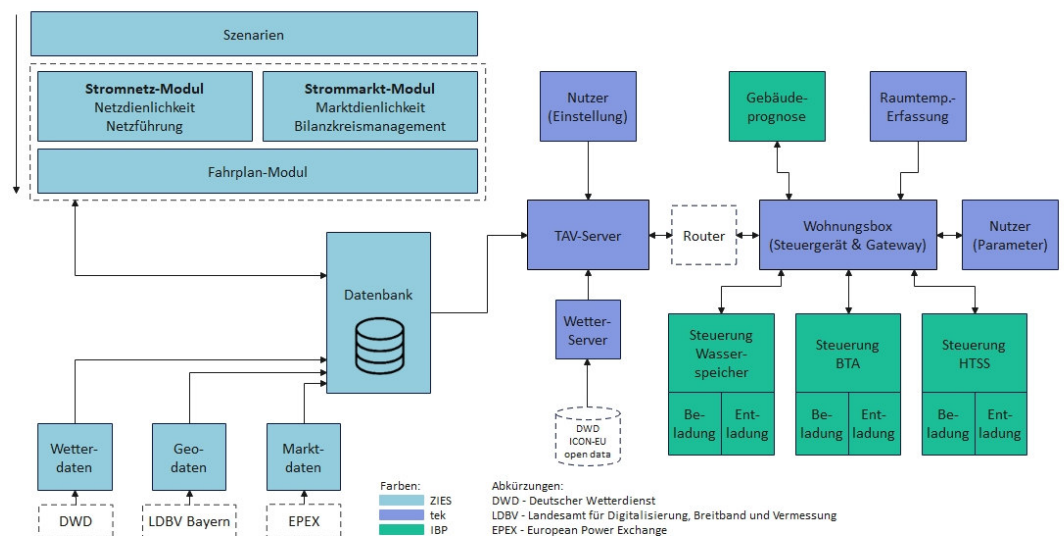


Bild 195: Schnittstellenkonzept zwischen Fraunhofer IBP, tekmar und dem Simulationsmodell des ZIES für den mehrkriteriell optimierten Betrieb der Flexibilitätsoption Windheizung 2.0.

5.6 Szenario 1: Entwicklung von Schaltvorschlägen in Form von Fahrplänen für die Flexibilitätsoption Windheizung 2.0 für Feldversuche in der Heizperiode 2020/2021

Es werden netz- und marktdienliche Schaltvorschläge in Form von Fahrplänen gebildet. Die Erzeugung von Bewegungsdaten auf Basis detaillierter Stammdaten des Netzgebietes sowie Ergebnissen der Prognosemodelle des DWD bilden Eingangsdaten für Leistungsflussberechnungen zum betrachteten Stromverteilernetz. Die Ergebnisse der Leistungsflussberechnungen dienen der Bildung netzdienlicher Schaltvorschläge. Die Implementierung historischer Marktdaten dient der Bildung marktdienlicher Schaltvorschläge (siehe Bild 196).

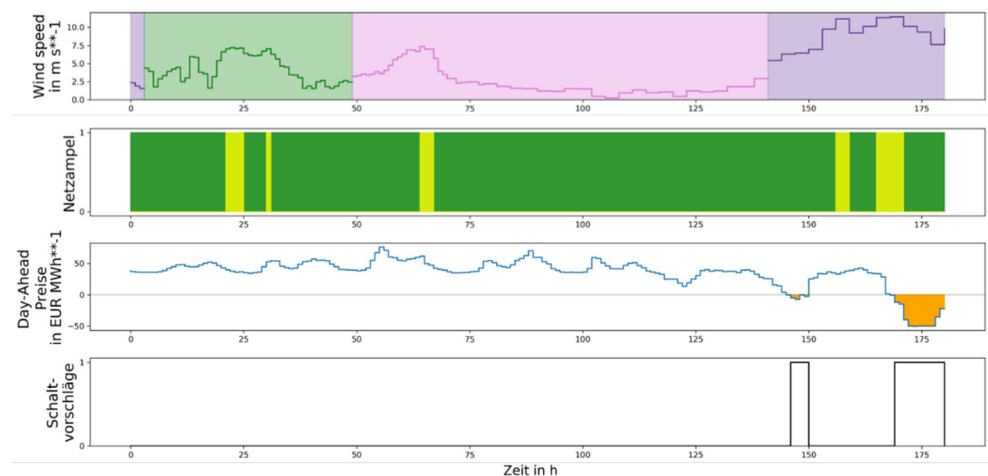


Bild 196:

Bildung von Schaltvorschlägen für einen Zeithorizont von 180 h.

Diagramme in der Reihenfolge von oben nach unten:

1) Ergebnisse der Prognosemodelle COSMO-D2, ICON-EU und ICON des Deutschen Wetterdienstes zur Windgeschwindigkeit. 2) Zustände der Netzampel auf Basis von Leistungsflussberechnungen zum betrachteten Netzgebiet. 3) Day-Ahead Markträumungspreise der EPEX SPOT. 4) Resultierende netz- und marktdienliche Schaltvorschläge.

Die rollierende Übermittlung von netz- und marktdienlichen Schaltvorschlägen in Form von Fahrplänen an den TAV-Server des Verbundpartners tekmar wurde für mehrere Feldversuche zu je 21 Tagen im Zeitraum Dezember 2020 – Mai 2021 erfolgreich realisiert.

Dies beinhaltet die Erzeugung von Bewegungsdaten auf Basis detaillierter Stammdaten sowie Ergebnissen historischer Prognosemodellläufe des DWD. Darauf aufbauende Ergebnisse von Leistungsflussberechnungen dienen der Erzeugung netzdienlicher Schaltvorschläge. Diese wiederum in Kombination mit marktdienlichen Schaltvorschlägen bilden die finalen Schaltvorschläge für die Flexibilitätsoption Windheizung 2.0.

Ein exemplarischer Feldversuchszeitraum der Zeitspanne 07.03.2021 – 27.03.2021 wird in Bild 197 dargestellt. Schaltvorschläge werden im 3 h Intervall basierend auf den stets aktuellen Prognosemodellläufen des DWD und resultierenden Netzzustandsgrößen des Stromnetzes sowie Strommarktinformationen (Day-Ahead Marktträumungspreise und gewichtete Mittelwerte des kontinuierlichen Intraday-Handels) erstellt.

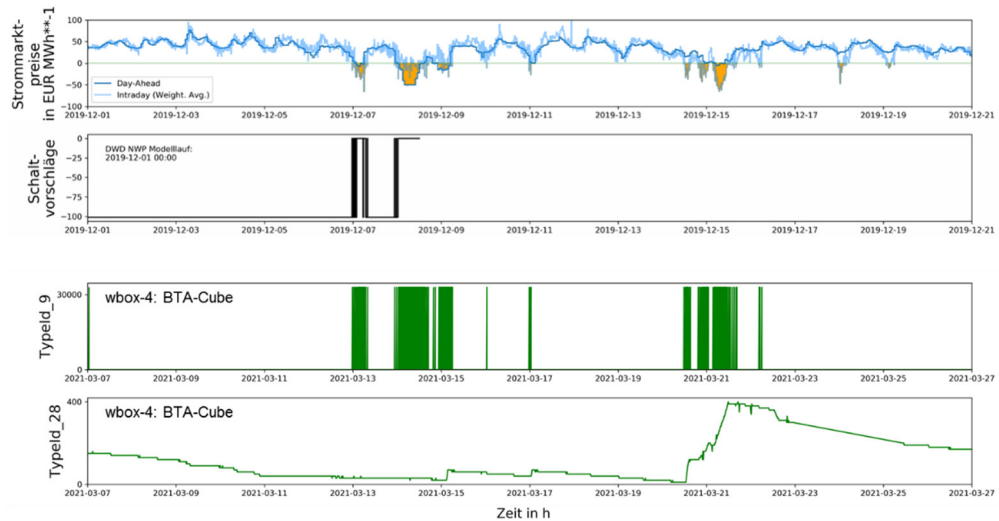


Bild 197:

Zeitcharakteristiken eines Feldversuches der Zeitspanne 07.03.2021 – 27.03.2021. 1) Strommarktpreise sowie 2) Schaltvorschläge basierend auf historischen (01.12.2019 – 21.12.2019) markt- und netzdienlichen Kriterien. Darstellung auf Datengrundlage des DWD NWP Modelllaufes (180 h Prognose) vom 01.12.2019 0:00 Uhr (ZIES-System). 3) Empfangene Schaltempfehlungen (Typeld_9) und 4) Ladegrad (Typeld_28) des Speichers der Windheizung 2.0 - Variante „BTA-Cube“ (tekmar-System).

5.7 Szenario 2: Entwicklung von Schaltvorschlägen in Form von Fahrplänen für die Flexibilitätsoption Windheizung 2.0 für den Feldversuch in der Zeitspanne Juni 2021 – Mai 2022

Es werden netz- und marktdienliche Schaltvorschläge in Form von Fahrplänen gebildet. Wie für das Szenario 1 erfolgt die Erzeugung von Bewegungsdaten auf Basis detaillierter Stammdaten des Netzgebietes und Wetterdaten des DWD, welche die Eingangsdaten für Leistungsflussberechnungen zum betrachteten Netzgebiet bilden. Einen wesentlichen Unterschied zu Szenario 1 bildet die Anwendung von historischen Messdaten des DWD für den Zeitraum 01.06.2019 - 31.05.2020. Die Ergebnisse der Leistungsflussberechnungen dienen der Bildung netzdienlicher Schaltvorschläge. Die Implementierung historischer Marktdaten für die Zeitspanne 01.06.2019 - 31.05.2020 dient der Bildung marktdienlicher Schaltvorschläge.

Die rollierende Übermittlung von mehrkriteriellen Schaltvorschlägen in Form von Fahrplänen für den Feldversuch in der Zeitspanne 01.06.2021 - 31.05.2022 wurde erfolgreich realisiert.

Adressierung des Reststrombedarfes

Bereitstellung von markt- und netzdienlichen Schaltvorschlägen auf Basis historischer EPEX SPOT Marktdaten und Messdaten des DWD in Form von Fahrplänen an das Fraunhofer IBP für den Zeitraum 01.06.2019 - 31.05.2020 zum Zweck einer Methodenentwicklung zur ökonomisch sinnvollen Einhaltung von thermischen Behaglichkeitskriterien in Perioden mit hohem Reststrombezug. Bild 198 zeigt bereitgestellte Daten des Zeitraumes 01.11.2019 - 29.02.2020. Die Diagramme a) - k) stellen marktdienliche Schaltempfehlungen in Abhängigkeit eines vordefinierten Grenzpreises dar. Die Diagramme l) und m) beschreiben netzdienliche Schaltempfehlungen in Abhängigkeit zu adressierender und vordefinierter Netzampelphasen.

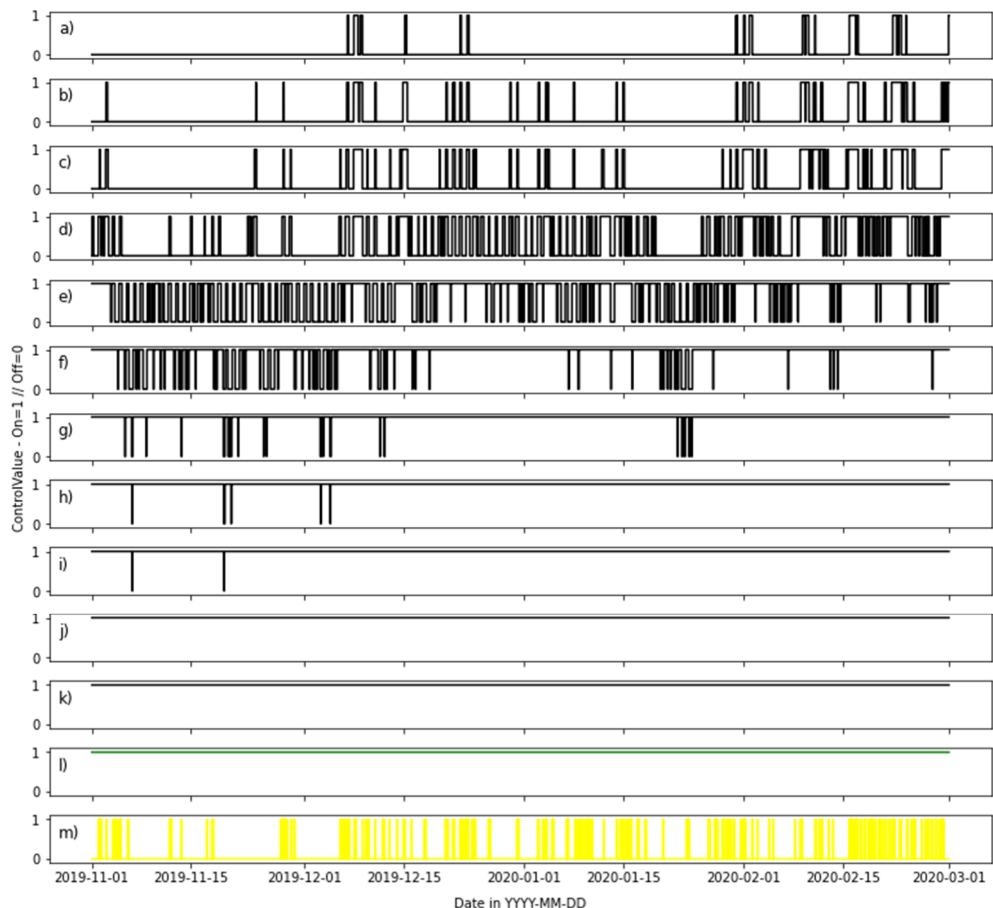


Bild 198:
 Zeitcharakteristiken markt- und netzdienlicher Schaltvorschläge der Zeitspanne 01.11.2019 – 29.02.2020. a) - k) Marktdienliche Schaltvorschläge für unterschiedliche Grenzpreise der EPEX SPOT Day-Ahead Markträumungspreise der Gebotszone Deutschland-Luxemburg sowie l) und m) Schaltvorschläge basierend auf netzdienlichen Kriterien. Lesehilfe: Die Grenzpreise werden von a) – k)

um 10 EUR/MWh inkrementiert. a) Day-Ahead Markträumungspreis ≤ 0 EUR/MWh bis k) Day-Ahead Markträumungspreis ≤ 100 EUR/MWh. Der Netzzustand ist gemäß Netzampel in l) grün, positiv gelb oder positiv rot und in m) positiv gelb oder positiv rot.

Um den in diesem Vorhaben angesetzten reduzierten Strompreis rechtfertigen zu können wird zunächst angenommen, dass der Bezug nur dann erfolgt, wenn einerseits der Börsenstrompreis ≤ 0 EUR/MWh ist (Bild 198 Diagramm a) = 1) und zusätzlich der Bezugszeitpunkt innerhalb grüner, positiv gelber oder positiv roter Ampelphasen liegt. Dies führt in dem in Bild 198 betrachteten Zeitraum vom 01.11.2019 bis zum 01.03.2020 zu dem in Bild 199 dargestellten Fahrplan. Auf Grund der zwei erkennbaren Zeitspannen ohne Börsenpreise ≤ 0 EUR/MWh in November und Januar ist dieses Fahrplankriterium nicht zielführend. Um diese Lücken zu füllen, muss ein Strompreis von ≤ 30 EUR/MWh (3 ct/kWh) (Bild 198 Diagramm d) = 1) akzeptiert werden. Um weiterhin reduzierte Endkundenstrompreise argumentieren zu können wird hier die zweite Bedingung dahingehen verschärft, dass während der Akzeptanz des höheren Strompreises der Bezug nur zu explizit netzdienlichen Zeiten (Bild 198 Diagramm m) = 1; Ampelphasen positiv gelb oder positiv rot) erfolgt. Die resultierenden Überbrückungs- und Ladezeiten sind in Tabelle 24 zusammengestellt. Entsprechend wird deutlich, dass eine typische, große Überbrückungsperiode (95 Prozent-Quantil) 144 Stunden bzw. 1 Woche lang ist und ein typischer Ladezyklus 2,5 Stunden andauert. Bild 200 zeigt den a) originalen und den b) neuen Fahrplan gemeinsam mit den c) Zeiträumen in denen höhere Börsenstrompreise bis zu 30 EUR/MWh akzeptiert werden. Bild 201 zeigt denselben Fahrplan für ein vollständiges Jahr.

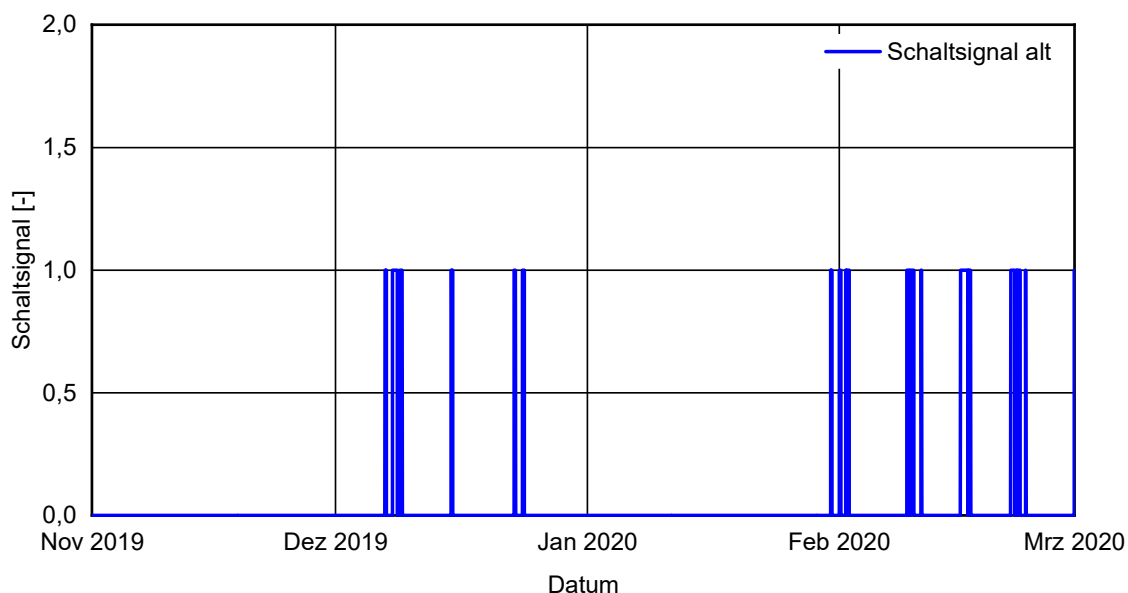


Bild 199:
Fahrplan basierend auf Schalteempfehlungen zu a) EPEX SPOT Day-Ahead Handelsergebnissen ≤ 0 EUR/MWh sowie b) Ampelphasen grün, positiv gelb oder positiv rot für den Zeitraum 1.11.2019 - 1.03.2020.

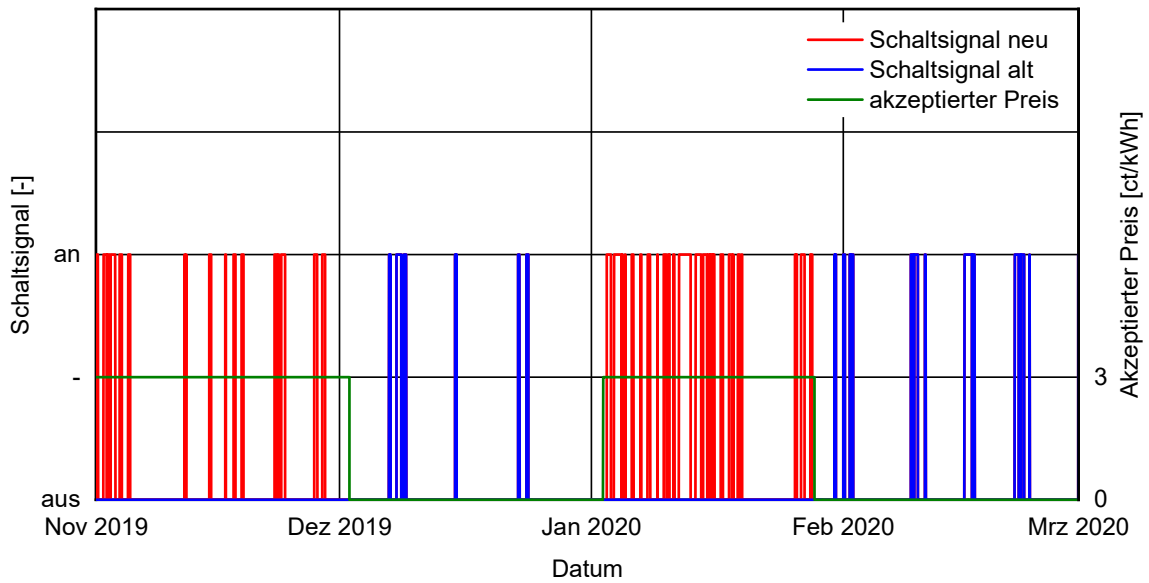


Bild 200:
Originaler (blau) und neuer Fahrplan (rot) mit zeitweise höheren akzeptieren Strompreisen (grün). 1.11.2019 - 1.03.2020.

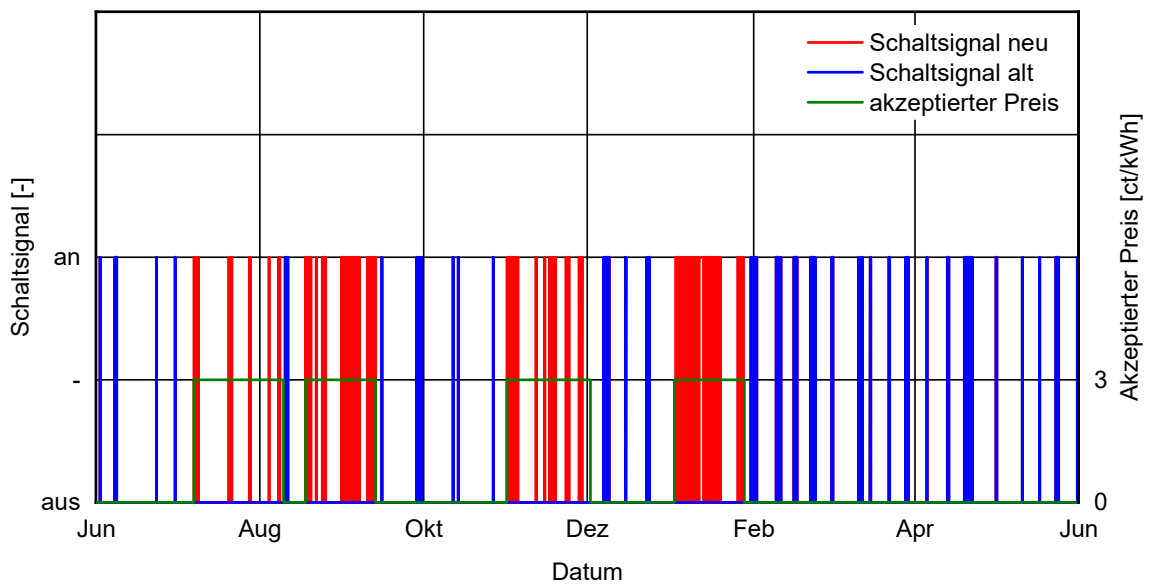


Bild 201:
Originaler (blau) und neuer Fahrplan (rot) mit zeitweise höheren akzeptieren Strompreisen (grün) für ein vollständiges Jahr, beginnend am 1.06.2019.

Tabelle 24:
 Statistische Übersicht der Überbrückungs- und Ladezeiträume.

| | Laden | Überbrücken |
|--------|------------|-------------|
| | [h] | [h] |
| 5 % | 0,0 | 0,25 |
| Median | 1,0 | 15 |
| Mean | 2,7 | 51 |
| 95 % | 9,0 | 170 |
| MAX | 22 | 312 |
| Summe | 66 | - |

In Bild 202 ist das Ladepotential in Stunden im Verlauf der letzten Woche (links) und der letzten 2 Wochen (rechts) mit dem (Standard-) Netzsignal dargestellt. Der ursprüngliche Ansatz von 9 Stunden pro 2 Wochen [1] ist auf der Y-Achse separat markiert. Man kann hier erkennen, dass auch dieses angepasste Signal sowohl bei einem einwöchigen als auch bei einem zweiwöchigen Betrachtungszeitraum Perioden enthält, in denen das Ladepotential deutlich weniger als die ursprünglich geplanten 9 Stunden beträgt.

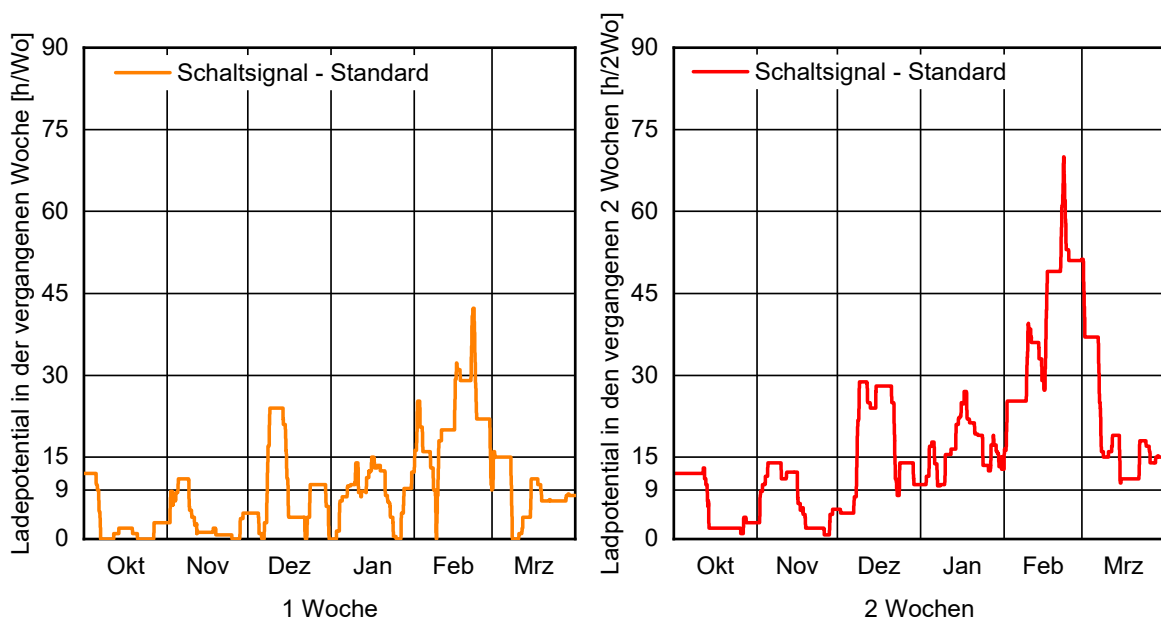


Bild 202:
 Ladepotential in Stunden im Verlauf der letzten Woche (links) und der letzten 2 Wochen (rechts) mit dem (Standard-) Netzsignal. Der ursprüngliche Ansatz von 9 Stunden pro 2 Wochen [1] ist auf der Y-Achse separat markiert.

Tabelle 25:
Statistische Übersicht der Überbrückungs- und Ladezeiträume.

| Zustand | Laden | | Überbrücken | |
|------------|------------|------------|-------------|------------|
| Einheit | [h] | | [h] | |
| Windprofil | Standard | Streng | Standard | Streng |
| 5 % | 0,0 | 1,0 | 0,25 | 1,00 |
| Median | 1,0 | 3,5 | 15 | 21,5 |
| Mean | 2,7 | 4,9 | 51 | 123 |
| 95 % | 9,0 | 14 | 170 | 291 |
| MAX | 22 | 22 | 312 | 984 |
| Summe | 66 | 47 | - | - |

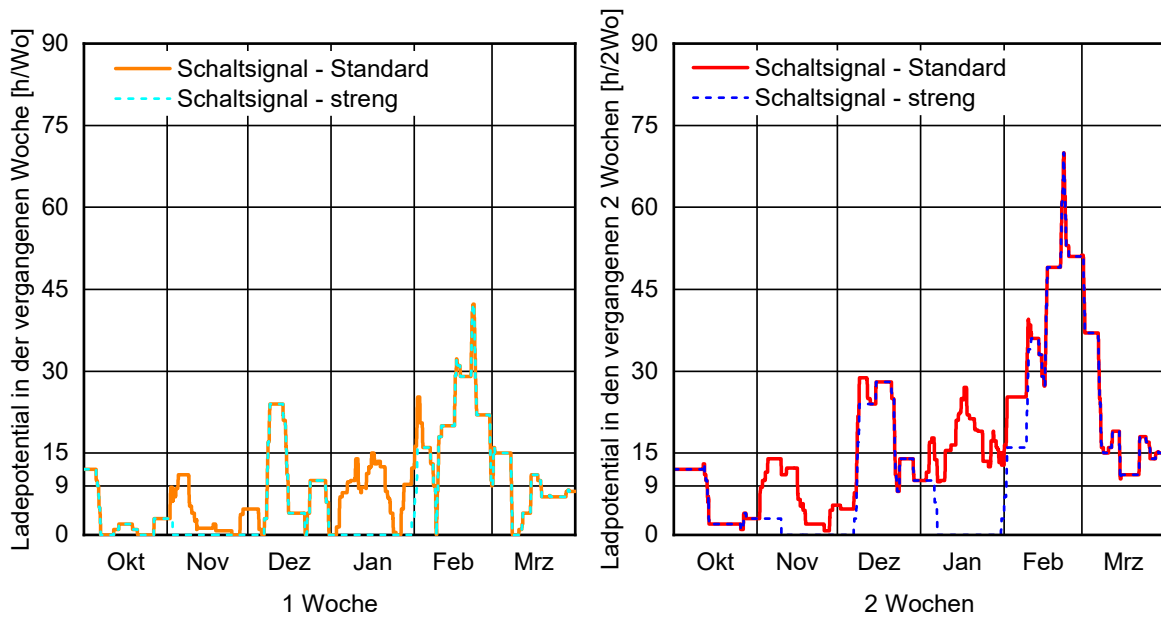
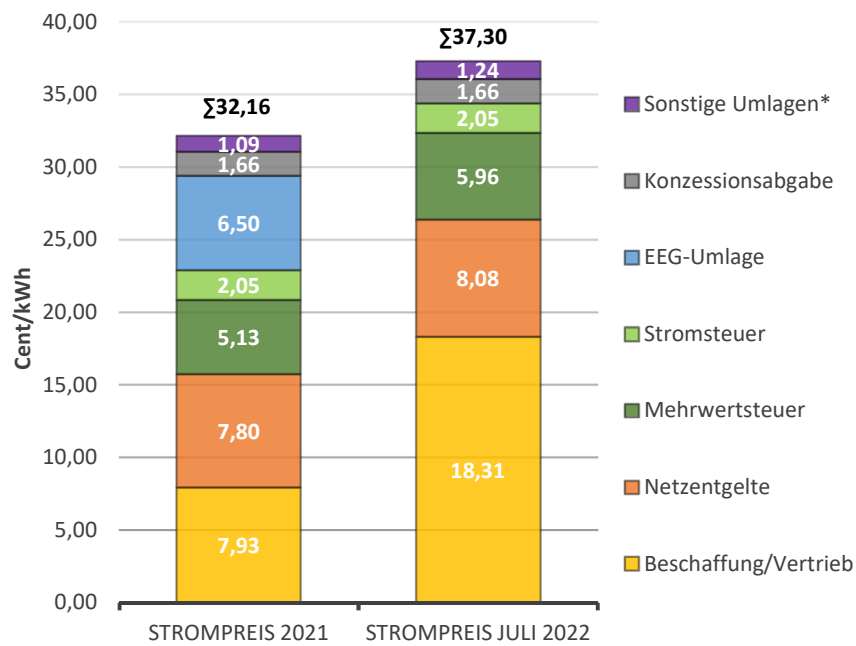


Bild 203:
Ladepotential in Stunden im Verlauf der letzten Woche (links) und der letzten 2 Wochen (rechts) mit dem (Standard-) Netzsignal. Der ursprüngliche Ansatz von 9 Stunden pro 2 Wochen [1] ist auf der Y-Achse separat markiert.

5.8 Erarbeitung von Vorschlägen für die Flexibilisierung von Strompreisbestandteilen

Es erfolgt die Darstellung, Bewertung sowie Erarbeitung von Vorschlägen zur Flexibilisierung von Strompreisbestandteilen für Kunden im Haushaltsbereich (Standardlastprofil SLP H0) mit Flexibilitätsoption wie sie das Windheizung 2.0-System darstellt. Der Strompreis wird aufgeschlüsselt und die ihn bildenden Preisbestandteile in Bild 204 dargestellt.



* Offshore-Netzumlage, AbLaV-Umlage, KWKG-Umlage, §19 StromNEV-Umlage

Bild 204: Strompreisbestandteile im Jahr 2021 sowie im ersten Halbjahr 2022 für Haushaltskunden (SLP H0) gemäß [36].

Die Komponenten EEG-Umlage, Netzentgelte, Konzessionsabgabe und Stromsteuer werden detailliert betrachtet, bewertet und Flexibilisierungsvorschläge auf Basis eines +/- 50 Prozent Intervalls um den Ausgangspreis dargestellt. Bild 205 zeigt vier Flexibilisierungsvorschläge verschiedener Ausprägung für die dargestellten Preisbestandteile.

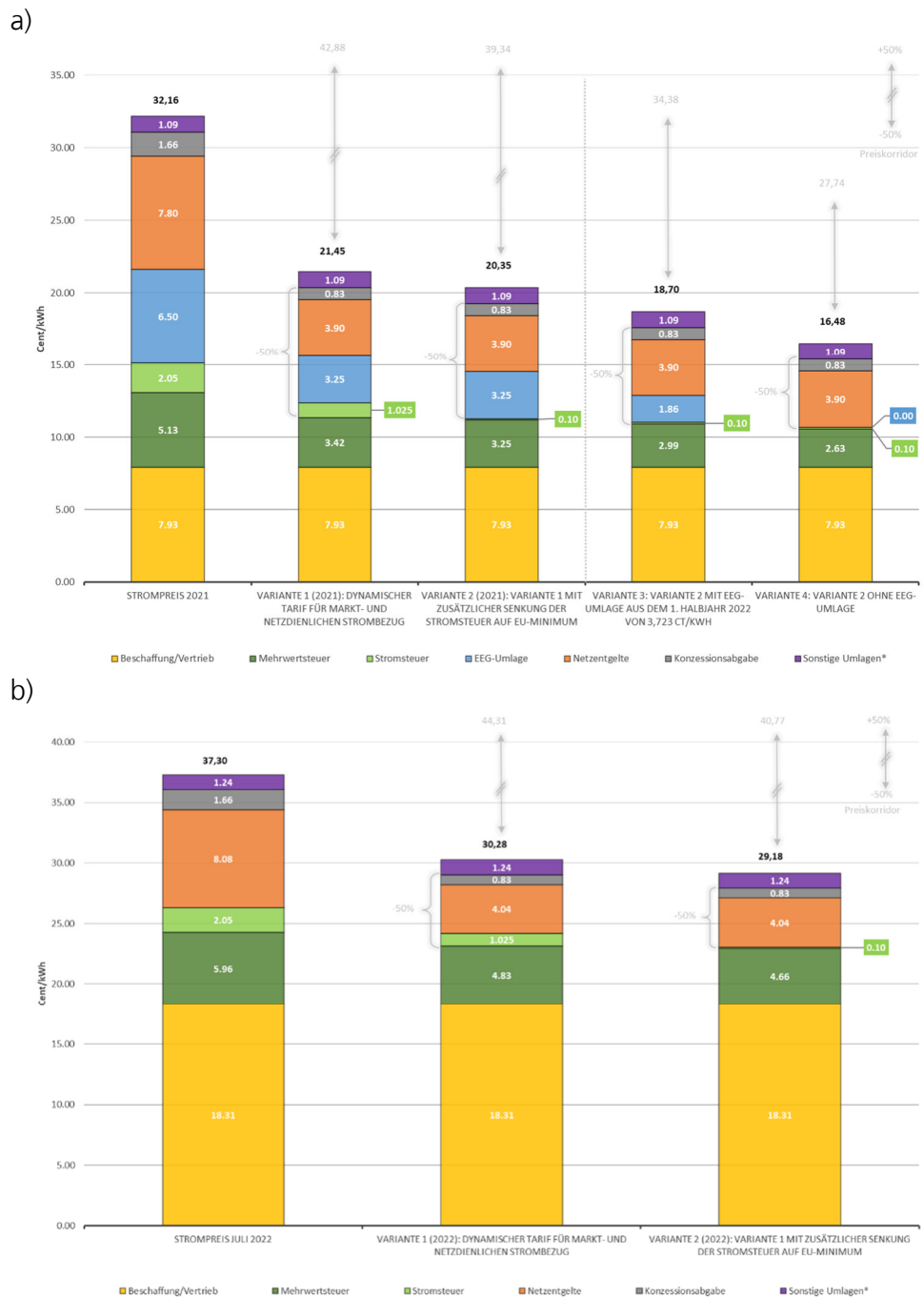


Bild 205:
Flexibilisierungsvorschläge der Strompreisbestandteile EEG-Umlage, Netzentgelte, Konzessionsabgabe und Stromsteuer für einen durchschnittlichen Haushaltskunden (SLP H0) mit 3.500 kWh/a elektrischem Energiebedarf. a) 2021 und b) 1. Halbjahr 2022.

Bild 205a zeigt vier Varianten für die Flexibilisierung von Strompreisbestandteilen des Jahres 2021. Variante 1 repräsentiert eine variable Ausgestaltung der a) EEG-Umlage bei marktdienlichem Strombezugsverhalten und b) Netzentgelte und Konzessionsabgabe bei netzdienlichem Verhalten sowie c) eine allgemeine Reduktion der Stromsteuer. Variante 2 erweitert diesen Gedanken um die Reduktion der Stromsteuer auf 0,1 ct/kWh (EU-Minimum). Variante 3 verwendet als Ausgangsposition der EEG-Umlage den Wert für das 1. Halbjahr 2022 von 3,723 ct/kWh und Variante 4 reduziert die EEG-Umlage auf 0 ct/kWh. Die vier Varianten bieten in der dargestellten Form durch Anpassungen von Abgaben, Umlagen und Steuern eine Reduktionsmöglichkeit der Strombezugskosten von rd. -10 bis -15 ct/kWh.

Die Entwicklungen auf den Strommärkten im Jahr 2022 resultieren in steigenden Kosten für Beschaffung/Vertrieb (gelb) sowie Netzentgelte (orange). Der BDEW veröffentlichte im Juli 2022 eine entsprechende Strompreisanalyse [36] und quantifiziert die durchschnittlichen Kosten für Beschaffung/Vertrieb mit 18,31 ct/kWh sowie Netzentgelte mit 8,08 ct/kWh. Bild 205b zeigt durch den Wegfall der EEG-Umlage im Jahr 2022 zwei verbleibende Varianten für die Flexibilisierung von Strompreisbestandteilen. Beide Varianten repräsentieren die aktualisierten Strompreisbestandteile des BDEW für das 1. Halbjahr 2022, angewendet auf die Varianten 1 und 2 aus Bild 205a. Die zwei Varianten bieten in der dargestellten Form durch Anpassungen von Abgaben, Umlagen und Steuern eine Reduktionsmöglichkeit der Strombezugskosten von rd. -5 bis -6 ct/kWh.

6 Ergebnisse

6.1 Betriebszustände

Die Betriebszustände wurden im Rahmen der Regelungsentwicklung erstellt und während der Freilandmessungen (siehe Abschnitt 2.5) optimiert. Für den WWS fand diese Optimierung im Rahmen der in Abschnitt 4.2.5 beschriebenen Simulationsstudie zur Justierung des Windperiodenverfahrens statt. Der finale Stand der Betriebszustände aller drei Speichertypen, BTA-Speicher, Hochtemperatur-Steinspeicher (HTSS) und Wasserbasierter Wärmespeicher (WWS) sind in Abschnitt 2.3.5 dokumentiert. In Anhang A.1 ist das tatsächliche Regelungsverhalten der messtechnisch untersuchten Speicher dokumentiert.

6.2 Energiebilanzen

Die zentrale Fragestellung für alle Windheizung 2.0-Speicher ist, wie lange diese die Wärme speichern können und über welche Mechanismen die eingespeicherte Wärme, aktiv oder passiv, an das Gebäude abgegeben wird. Die entsprechenden, messtechnischen Untersuchungen am Freilandversuchsgelände (siehe Abschnitt 2.5) wurden von Januar bis April 2022 durchgeführt. Um die Interpretation bzw. Einordnung dieser Energiebilanzen zu ermöglichen, sind in

Bild 206 und Tabelle 26 die klimatischen Randbedingungen aufgeführt, die während des Messzeitraums vorlagen. Zusammengefasst wird deutlich, dass das Frühjahr 2022 in Holzkirchen etwa 1 – 2 K wärmer war als das langjährige Mittel für diese Region [37]. Im Vergleich mit dem deutschen Referenzklima sind die Außenlufttemperaturen - bis auf den kalten April 2022 - typisch, während die solare Einstrahlung über den entsprechenden Werten des Referenzklimas lag.

Tabelle 26:

Monatsmittelwerte der Außenlufttemperatur und der solaren Globalstrahlung während der Messperiode vom Januar bis April 2022 am Freilandversuchsgelände des Fraunhofer IBP bei Holzkirchen, inklusive der Testreferenzjahre (2011) [37] von Potsdam (Nr. 4) und von München (Nr. 13).

| | TRJ 4 Potsdam | TRJ 13 München/Passau | Messung Gelände Fraunhofer IBP |
|--|------------------|--------------------------|-----------------------------------|
| Mittlere Außenlufttemperatur [°C] | | | |
| Januar | +1,0 | -1,2 | +0,3 |
| Februar | +1,9 | +0,4 | +2,7 |
| März | +4,7 | +4,3 | +3,7 |
| April | +9,2 | +8,2 | +6,5 |
| Summe der mittleren, monatlichen Einstrahlung [kWh/(m ² *Mon)] | | | |
| Januar | 29 | 43 | 37 |
| Februar | 44 | 53 | 58 |
| März | 97 | 107 | 121 |
| April | 189 | 141 | 124 |

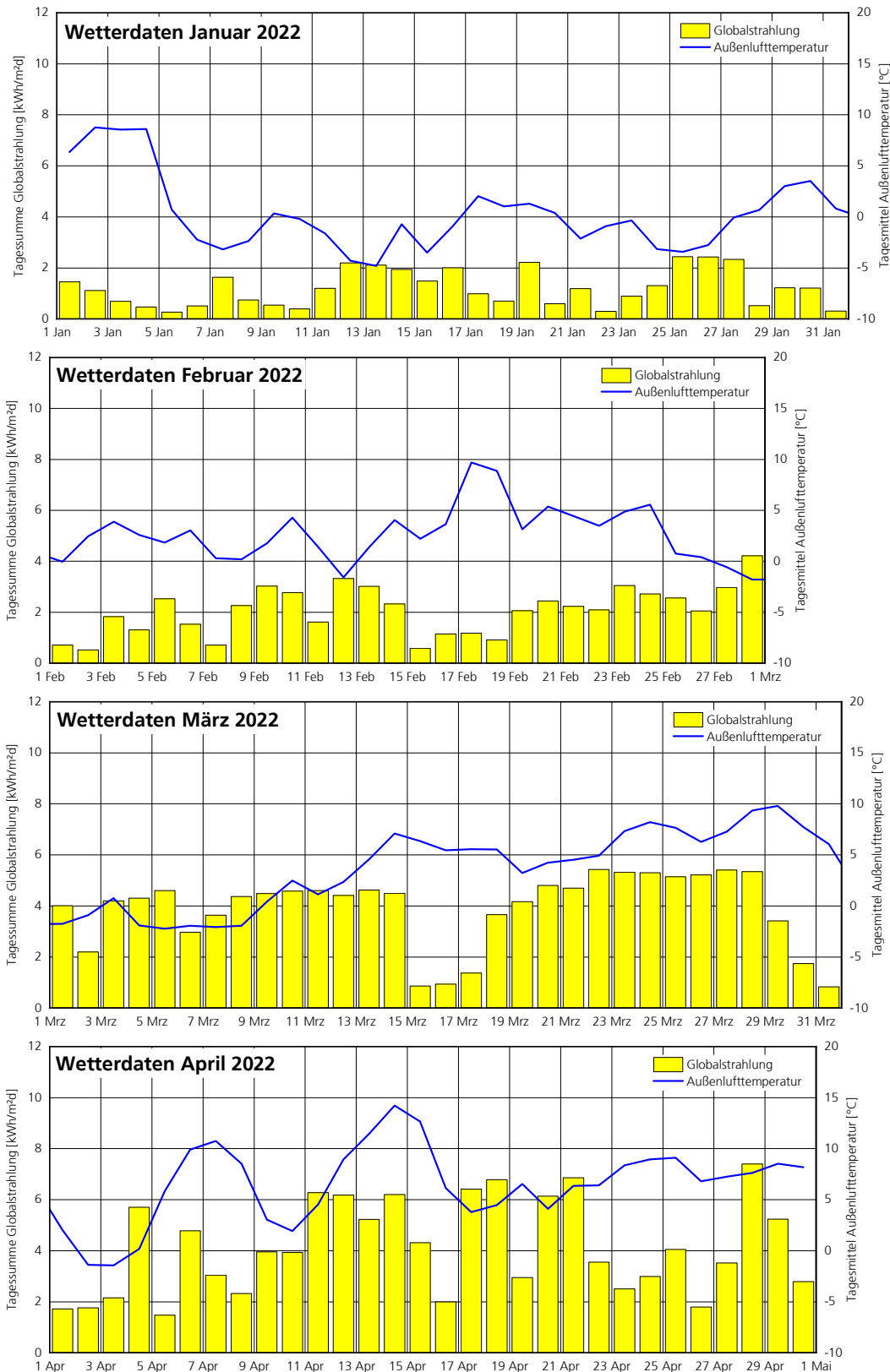


Bild 206:
 Tagesmittelwerte der Außenlufttemperatur und der solaren Globalstrahlung während der Messperiode vom Januar bis April 2022 am Freilandversuchsgelände des Fraunhofer IBP bei Holzkirchen.

6.2.1 Neubau-BTA / CUBE

In Bild 207 sind im oberen Kurvenfenster die kumulierten Energiequellen und -senken der BTA-Speicherdecke, sowie der aktuelle (nicht-kumulierte) Speicherinhalt dargestellt. Die schwarze Linie zeigt hierbei die für die BTA-Ladung eingesetzte Wind- bzw. Überschussstrommenge, die rote Linie beinhaltet zusätzlich die Nachheizung mit Windstrom. Die Differenz zwischen roter und orangener Linie zeigt somit die Reststrommenge zur Nachheizung in Zeiten ohne Windstrom. Die dargestellten Energiequellen enthalten auch die bezogenen Reststrommengen, auch wenn diese genau genommen nicht in den Speicher geladen werden. Hierdurch wird der gesamte Energieverbrauch zur Beheizung dargestellt und damit eine Einordnung des Windstromanteils möglich. Bei den Energiesenken werden die im Betrachtungszeitraum kumulierten Wärmeverluste der Decke an die Außenluft (rot schraffiert), die passive Entladung der BTA über die seitlichen Wandeinbindungen (grün schraffiert) sowie die passive und aktive Entladung inkl. einer eventuell zusätzlich nötigen Nachheizung in den Raum (blau schraffiert) dargestellt. Der pink schraffierte Bereich zeigt hierbei den Anteil der aktiven Entladung.

Für eine vollständige Energiebilanz der BTA im Betrachtungszeitraum sollten die gestapelten, schraffierten Flächen der Energiesenken, zusammen mit der Differenz des Ist-Speicherladegrads, die schwarze Linie (Windstrommenge BTA-Ladung) betrachtet werden.

Die Differenz des Ist-Ladegrads errechnet sich aus dem Ist-Ladegrad zum Monatsanfang minus dem Ist-Ladegrad zum Ende des Betrachtungszeitraums (z.B. Monatsende). Die dunkelgrüne Linie im zweiten Kurvenfenster von oben repräsentiert den Ist-Ladegrad. Man kann in den oberen Kurvenfenstern die sprunghaften Anstiege bei den Energiequellen und dem Speicherinhalt erkennen, welche entstehen, wenn die BTA bei Überschussstromsignalen geladen wird.

Das aus der Überschussstromverfügbarkeit resultierende Sollladegrad-Signal für den Speicher (hellgrüne Linie) und der aktuelle Ist-Ladegrad bzw. die aktuelle Speichertemperatur sind im zweiten Kurvenfenster von oben grün schraffiert dargestellt. Im dritten Kurvenfenster sind die Signale für die aktive Entladung des Speichers (blau) und für das Nachheizen mit Reststrom (orange) dargestellt. Das unterste Kurvenfenster zeigt den Verlauf der Soll-Raumlufttemperatur (rot gestrichelt) und der gemessenen Raumlufttemperatur (grüne Linie)

Nach den Beladephase mit steigendem Ist-Ladegrad sinkt die Speicherladung wegen der Wärmebedarfsdeckung des Gebäudes langsam wieder ab. Die Entladung gliedert sich hierbei in zwei Teilbereiche, die passive und die aktive Entladung. Tendenziell nimmt die passive Entladung mit sinkendem Ladegrad bzw. sinkender Temperaturdifferenz zwischen Speicher und Raumluft ab. Ist der Ladegrad zu gering, so dass die passive Entladung den Wärmebedarf nicht mehr decken kann, wird die aktive Entladung (blaue Linie; unteres Kurvenfenster) aktiviert und der Speicher wird direkt, d.h. aktiv entladen. Diese zusätzliche Entladeleistung ist auch am schnelleren Absinken der Speichertemperatur erkennbar (siehe z.B. 21. Jan). Am Unterschied zwischen der roten und orangenen Linie im obersten Kurvenfenster, sowie dem fast nicht auftretenden Nachheizsignal (orange, unteres Kurvenfenster) kann man erkennen, dass der CUBE im Januar

fast keinen Reststrom benötigt. An der Größe der blauen Schraffur (oberes Kurvenfenster) wird deutlich, dass die BTA ihre Wärme hauptsächlich über die passive Entladung abgibt. Die abgeschätzte, ungewollte, passive Entladung über die Wärmebrücken an der Wandeinbindung (grüne Schraffur) ist im Verhältnis zu der durch die Deckenfläche sehr gering, ebenso wie die (für diesen Versuch) ungewollten Wärmeverluste durch das Adiabatdach (rote Schraffur). Es wird auch ersichtlich, dass über die aktive Entladung (magenta Fläche) ebenfalls nur sehr wenig Energie in den Raum eingebacht wird.

Die von der Regelung gesetzten Soll-Ladegrade sind zielführend, da die verbleibenden Ist-Ladegrade an den drei Tiefstständen im Januar mit 2 x 25 Prozent und 1 x 5 Prozent relativ niedrig sind. Im Zeitraum vom 17. – 27.01. kann man erkennen, dass eine auf ca. 80 Prozent aufgeladene BTA genügt, um einen Zeitraum von 10 Tagen zu überbrücken.

Bezüglich der Raumlufttemperaturen zeigt sich, dass es keine wesentlichen Unterschreitungen gibt. Überschreitungen der Raumlufttemperaturen um mehr als 2 K treten nur dann auf, wenn Sonne durch das Südfenster fällt.

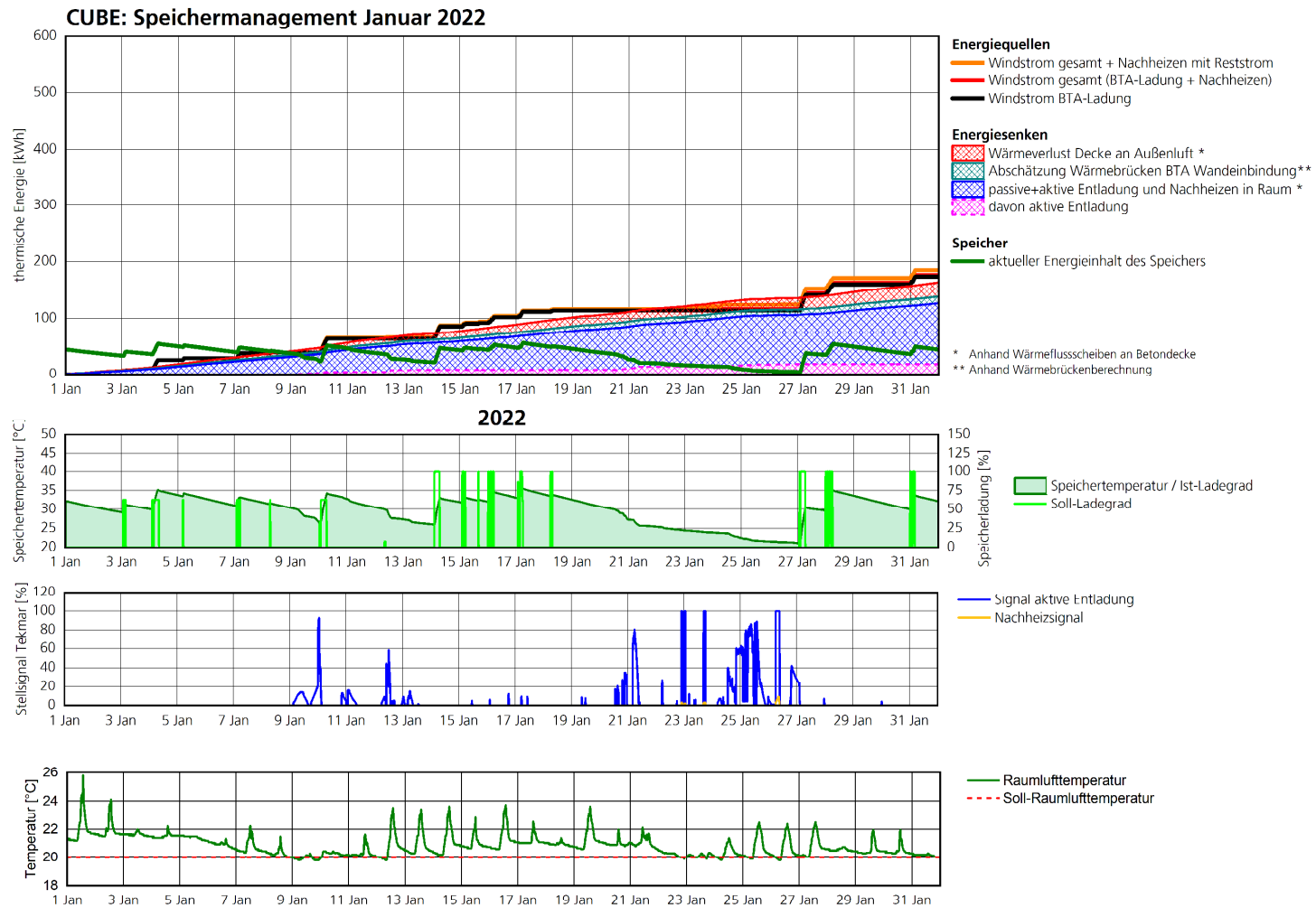


Bild 207:
Kumulierte Energiebilanzen und Regelungsvorgaben für die Neubau-BTA im CUBE für den Januar 2022.

Bild 208 und Bild 209 zeigen die Weiterführung der kumulierten Energiebilanzen für die nächsten zwei Monate, Februar und März 2022. Am 2. Februar kann man einen potentiellen Ladepuls erkennen, der aber nicht umgesetzt wird, da dessen Ladegrad-Sollwert geringer ist als der Ist-Ladegrad (hellgrüne Linie niedriger als dunkelgrüne Linie, mittleres Kurvenfenster). Dieses Verhalten ist korrekt, da direkt vor dem nächsten Ladepuls, gut 9 Tage später, der Speicher noch zu ca. 10 Prozent geladen ist (9.02.), d.h. der Wärmebedarf des Raumes konnte in dieser Zeit vollständig durch die bereits vorhandene Speicherladung gedeckt werden. Im weiteren Verlauf der beiden Monate sind die gewählten Soll- bzw. die resultierenden Ist-Ladegrade wegen der fehlenden Über-temperaturrückführung etwas zu hoch (siehe Abschnitt 6.3.3). Dadurch sind die Speichertemperaturen und somit auch die passive Entladung etwas zu hoch, woraus erhöhte Raumlufthtemperaturen resultieren. Auch ist wegen der hohen passiven Entladung ab dem 9.02. kein Nachheizen mit Reststrom und ebenso fast kein aktives Entladen notwendig. Entsprechend steigt die rote Linie des Windstrombezugs regelmäßig an, während die orangene Linie, die zusätzlich den Reststrom enthält, ab dem 9.02. parallel zur roten Linie läuft.

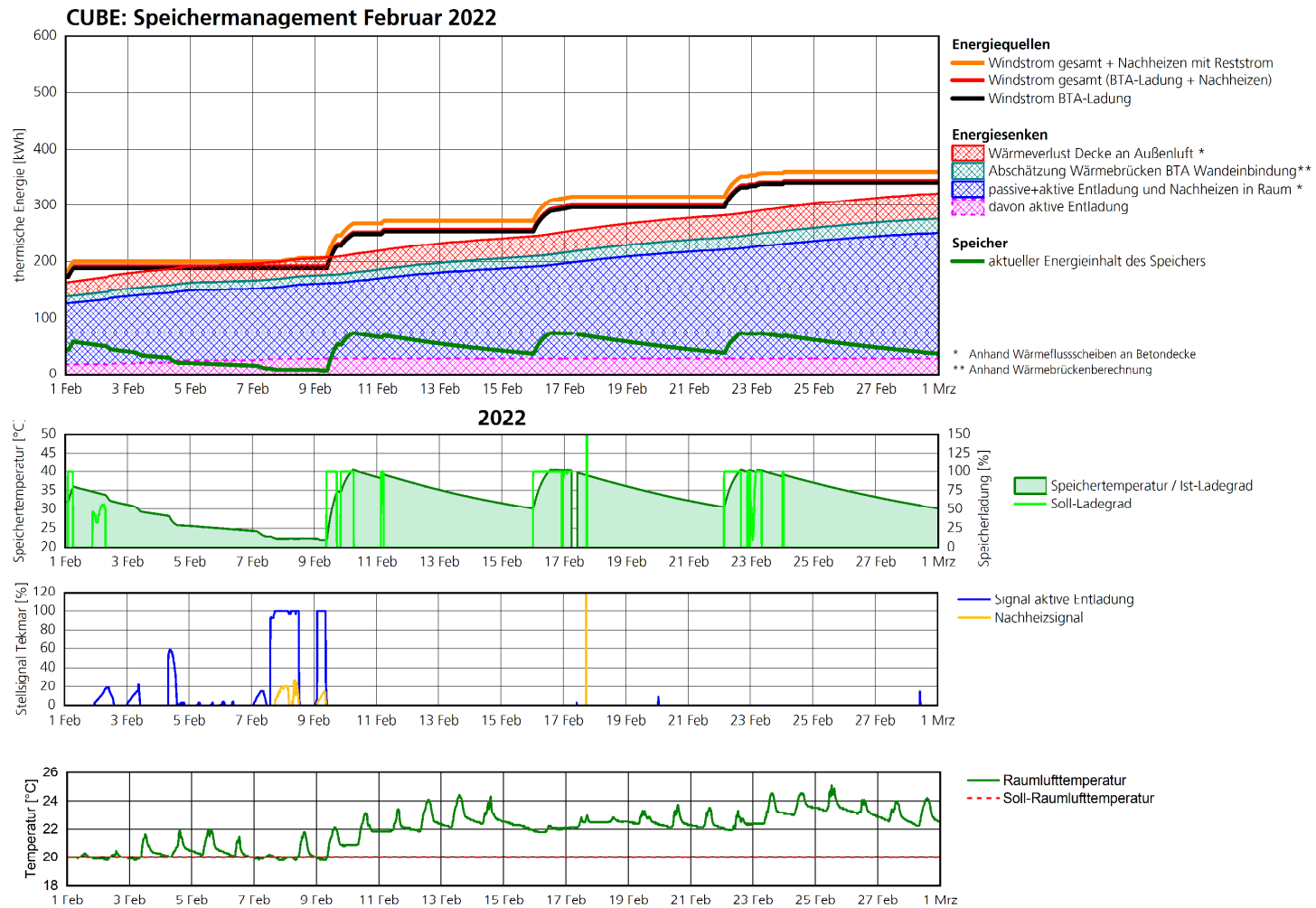


Bild 208:
 Kumulierte Energiebilanzen und Regelungsvorgaben für die Neubau-BTA im CUBE für den Februar 2022.

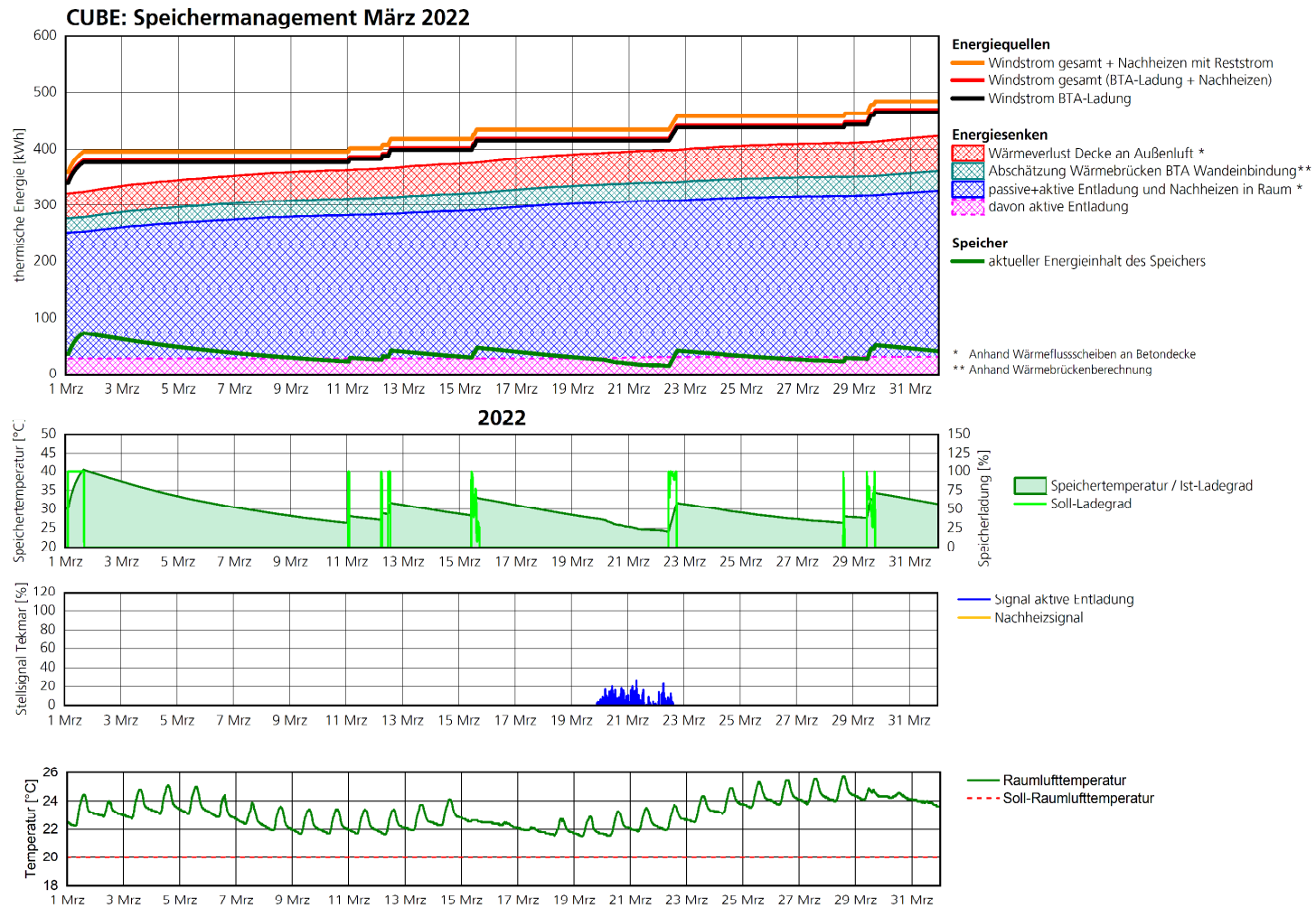


Bild 209:
Kumulierte Energiebilanzen und Regelungsvorgaben für die Neubau-BTA im CUBE für den März 2022.

Die Fortführung der Energiebilanzen bzw. Regelungsvorgaben für den April 2022 (sonnenreicher als das Referenzklima) ist in Bild 210 dargestellt. Der Verlauf ist im Wesentlichen vergleichbar mit den Monaten Februar und März. Ab Mitte April kann man allerdings erkennen, dass die veränderte Übertemperaturrückführung (siehe Abschnitt 6.3.3) der Regelung langsam beginnt Wirkung zu zeigen, indem diese die Sollladegrade reduziert, allerdings noch nicht in ausreichendem Maße (vgl. hellgrüne Linie, mittleres Kurvenfenster).

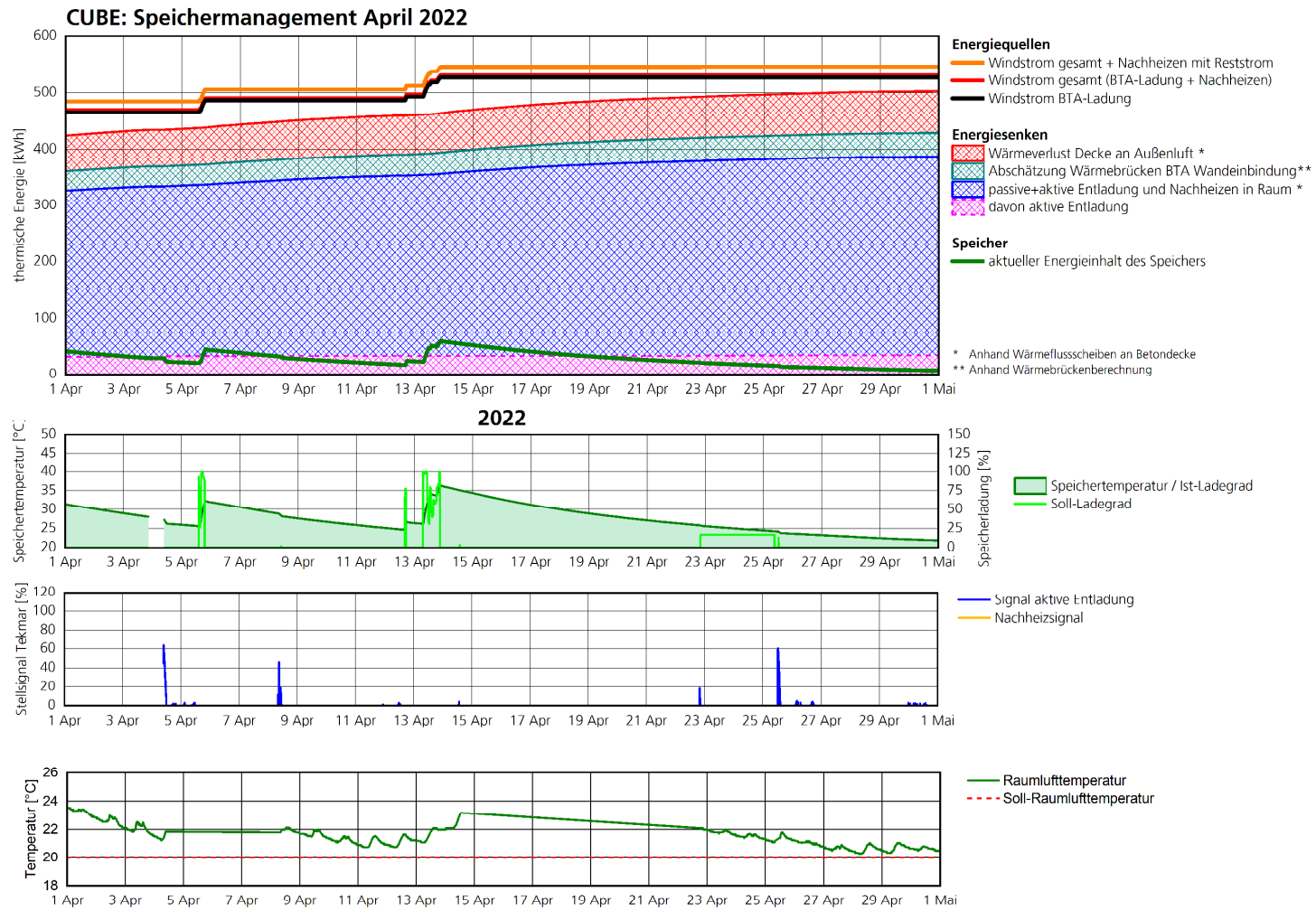


Bild 210:
Kumulierte Energiebilanzen und Regelungsvorgaben für die Neubau-BTA im CUBE für den April 2022.

6.2.2 Sanierungs-BTA / Zwillingshaus

Die Darstellung der Energiebilanzen und des Regelungsverhaltens für die Sanierungs-BTA in Bild 211 ist vergleichbar mit der entsprechenden Darstellung für die Neubau-BTA in Bild 207, allerdings verfügen beide Zwillingshäuser zusätzlich über eine TWW-Bereitung, welche entsprechend in den kumulierten Energiesenken als lila schraffierte Fläche (oberes Kurvenfenster) ergänzt ist. Im oberen Bereich in Bild 211 sind die kumulierten Energiequellen und –Senken der BTA-Speicherdecke, sowie der aktuelle (nicht-kumulierte) Speicherinhalt (grüne Linie) dargestellt. Hierbei gibt die schwarze Linie wieder die in die BTA eingespeicherte Wind- bzw. Überschussstrommenge wieder. Die rote Linie beinhaltet zusätzlich die Nachheizung mit Windstrom. Die Energiequellen enthalten ebenfalls die bezogenen Reststrommengen, auch wenn diese genau genommen nicht in den Speicher geladen werden. Zusammen mit der Windstrommenge ergibt sich damit die orange(ne) Linie für den gesamten Strombezug (Windstrom + Reststrom). Entsprechend sollten die gestapelten, schraffierten Flächen der Energiesenken, zusammen mit der Differenz des Speicherinhalts (Monatsanfangswert minus Füllstand zum Betrachtungszeitraum (z.B. Monatsende); dunkelgrüne Linie im oberen Kurvenfenster), die schwarze Linie der BTA-Ladung erreichen, nicht aber die rote oder orange Linie, welche die Nachheizung beinhaltet und damit Energiemengen, die nicht in den Speicher geladen werden. Die Differenz zwischen der roten und der orangenen Linie entspricht dabei dem Reststrombezug. Anhand der sprunghaften Anstiege bei den Energiequellen und dem Speicherinhalt kann man erkennen, wann die BTA bei Überschussstromsignalen geladen wird. Das aus der Überschussstromverfügbarkeit resultierende Sollladegrad-Signal (hellgrüne Linie) für den Speicher und der aktuelle Ist-Ladegrad bzw. die aktuelle Speichertemperatur (dunkelgrüne, gefüllte Linie) sind im zweiten Kurvenfenster von oben dargestellt. Im dritten Kurvenfenster finden sich die Signale für die aktive Entladung des Speichers (blaue Linie) und für das Nachheizen mit Reststrom (orange Linie).

Nach den Beladephase mit steigendem Ist-Ladegrad sinkt die Speicherladung wegen der Wärmebedarfsdeckung des Gebäudes wieder ab. Die Entladung gliedert sich hierbei in zwei Teilbereiche, die passive und die aktive Entladung. Tendenziell nimmt die passive Entladung mit sinkendem Ladegrad bzw. Temperaturdifferenz zwischen Speicher und Raumluft ab. Ist der Ist-Ladegrad so gering, dass die passive Entladung den Wärmebedarf nicht mehr decken kann, wird die aktive Entladung (blau, drittes Kurvenfenster) aktiviert und der Speicher entlädt sich wieder schneller bzw. die Raumheizleistung nimmt wieder zu. Am Unterschied zwischen der roten und orangenen Linie (oberes Kurvenfenster) sowie dem Nachladesignal (orange, drittes Kurvenfenster) kann man erkennen, dass die Sanierungs-BTA im Januar grob 1/3 Reststrom benötigt (hier muss berücksichtigt werden, dass das Zwillingshaus den Windheizung 2.0-Standard nicht ganz erreicht). An der Größe der dunkelblauen und der hellblauen Schraffuren (oberes Kurvenfenster) wird deutlich, dass die BTA ihre Wärme hauptsächlich ungesteuert über die passive Entladung - sowohl in den darunterliegenden EG-Raum als auch in den darüber liegenden DG-Raum - abgibt. Die abgeschätzte ungewollte, passive Entladung über die Wärmebrücken (grüne Schraf-

fur) bilden bei der Sanierungslösung ebenfalls einen signifikanten Teil der passiven Entladung. Es wird auch ersichtlich, dass über die aktive Entladung (magenta Fläche) ebenfalls nur sehr wenig Energie in den Raum eingebracht wird. Der Anteil der aktiven Wärmeentnahme aus der BTA für die TWW-Bereitung (lila Schraffur) ist ebenfalls erkennbar.

Die von der Regelung gesetzten Soll-Ladegrade sind zielführend, da die Ist-ladegrade an den drei Tiefstständen im Januar mit etwa 15 Prozent relativ niedrig sind (Ausnahme 18. Jan). Die Raumlufttemperaturen im Erdgeschoss bewegen sich größtenteils zwischen der Zieltemperatur von 20 °C und bis zu 2 K darüber (unteres Kurvenfenster), allerdings in Zusammenspiel mit relativ häufigem Nachheizen mit Reststrom. Die kurzen Unterschreitungen der Solltemperatur im Erdgeschoss (EG) kommen durch ein anfangs zu träges Regelverhalten des Re-Heat-Signals zu Stande. Die deutlichen Solltemperaturunterschreitungen im Dachgeschoss (DG) begründen sich darin, dass das Dachgeschoss über kein eigenes Übergabesystem (Flächenheizung) verfügt. Das ursprüngliche Konzept sah vor, dass sowohl über die maschinelle Lüftung mit Wärmerückgewinnung als auch durch das offene Treppenhaus die notwendige Heizwärme für das Dachgeschoss aus dem Erdgeschoss nach oben gelangt. Dieser Wärmeaustausch ist jedoch nicht ausreichend, da die bestehende Dachkonstruktion des Zwillingshauses nicht Passivhausniveau erreicht. Simulationen zeigen, dass es auch bei Gebäuden mit Passivhausniveau zu zeitweisen Unterschreitungen der Solltemperatur kommt. Ein vollständiges Entfallen der Wärmeübergabesysteme im Obergeschoss sollte daher kritisch geprüft und mit dem Bauherrn abgestimmt werden.

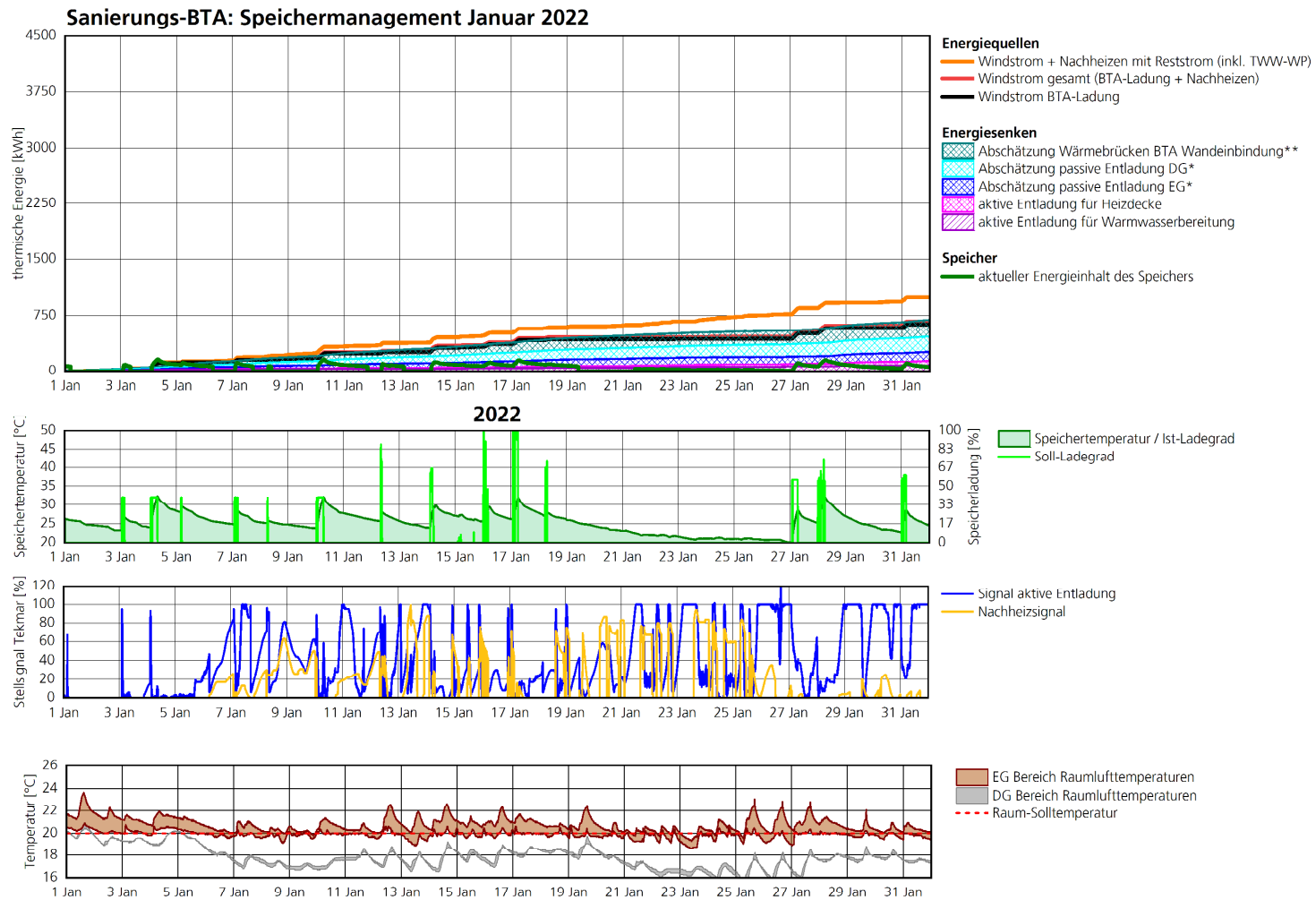


Bild 211:
Kumulierte Energiebilanzen und Regelungsvorgaben für die Sanierungs-BTA im Zwillingshaus für den Januar 2022.

In Bild 212 sind die entsprechenden Verläufe der Sanierungs-BTA für den Februar 2022 dargestellt. Man kann erkennen, dass bei sinkender BTA-Temperatur (grün gefüllte Kurve, zweites Kurvenfenster von oben) und entsprechend reduzierter passiver Entladung die aktive Entladung (blau drittes Kurvenfenster) beginnt die Raumlufttemperaturen zu regeln. Erst bei stark entladem BTA-Speicher wird mit Reststrom nachgeheizt (Nachheizsignal, orange). Aufgrund von weiteren Optimierungen im Speichermanagement (siehe nächster Absatz) nimmt der Reststrombezug im Vergleich zu Januar 2022 erkennbar ab (Differenz zwischen roter und orangener Linie im oberen Kurvenfenster steigt langsamer).

Die Raumlufttemperaturen werden erfolgreich in einem Korridor von 2 K oberhalb der Solltemperatur von 20 °C gehalten. Temperaturen oberhalb von 22 °C treten lediglich bei Sonneneinstrahlung auf. Während der erste Ladephase Anfang Februar sind die Soll-Ladegrade des Speichers noch nicht hoch genug. Als Folge entsteht vom 7. – 9.02., aufgrund des dadurch erforderlichen Nachheizens (orangene Linie, unteres Kurvenfenster), ein größerer Reststromanteil. Im folgenden Ladepuls sind die Sollwerte höher, die geforderte Wärme kann aber in der verfügbaren Zeit nicht eingespeichert werden. Um dem entgegen zu wirken, wird am 19.02. die Vorlauftemperatur der BTA-Ladung von 55 °C auf 65 °C angehoben, um den Wärmeübergang von der Hydraulik in den BTA-Speicher zu verbessern. Die Höhe der letzten beiden Februar-Ladepulse ist treffend bemessen. Am Ende der jeweiligen Überbrückungsperioden/Entladephase tritt fast kein Nachheizverbrauch (Reststrom) auf und der Speicher ist, bei eingehaltenen Raumlufttemperaturen, noch zu etwa 15 Prozent beladen. Hierbei werden Perioden von bis zu 5 Tagen erfolgreich überbrückt.

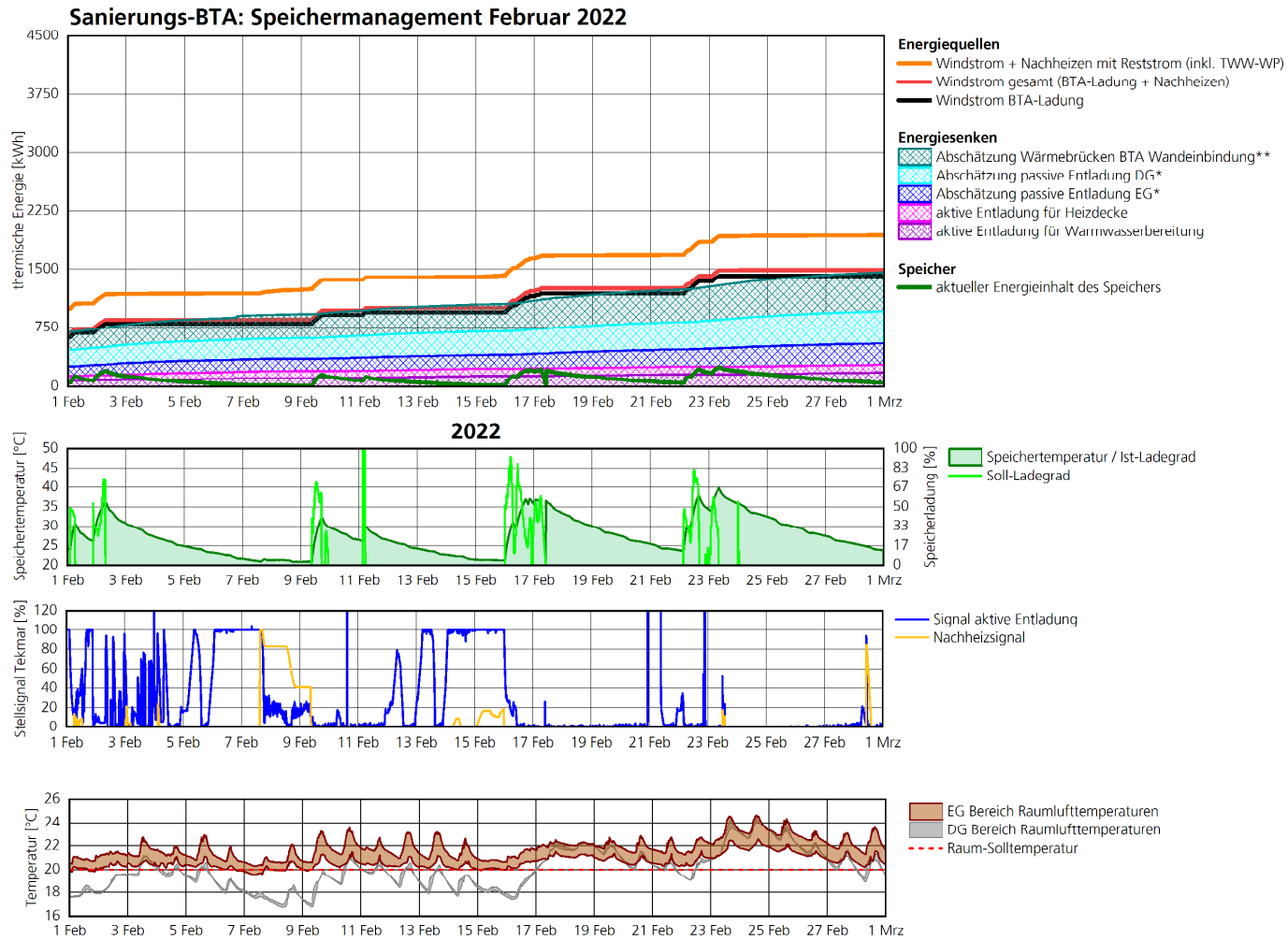


Bild 212:
Kumulierte Energiebilanzen und Regelungsvorgaben für die Sanierungs-BTA im Zwillingshaus für den Februar 2022.

Das in Bild 213 dargestellt Speicher- bzw. Regelungsverhalten im März ist mit dem im Februar vergleichbar. Die Soll-Ladegrad-Vorgabe des ersten Ladepulses ist auch hier etwas gering. Die anschließenden Sollwerte können aufgrund der begrenzten Wärmeübertragung auf den BTA-Kern trotz der erhöhten Vorlauf-temperatur (65 °C) nicht vollständig umgesetzt werden. Obgleich werden in der zweiten Märzhälfte zwei Perioden von etwa 7 Tagen erfolgreich überbrückt.

Wegen der steigenden Außenlufttemperaturen erhöhen sich ab Mitte März auch die Raumlufttemperaturen im DG.

Im April (siehe Bild 214) ist das Verhalten der Sanierungs-BTA von zu geringen Sollladegraden geprägt. Diese kommen dadurch zu Stande, dass sich die hinzugefügte Rückführung von Raum-Überwärmungen in der Trainingsphase befindet (siehe Abschnitt 6.3.3).

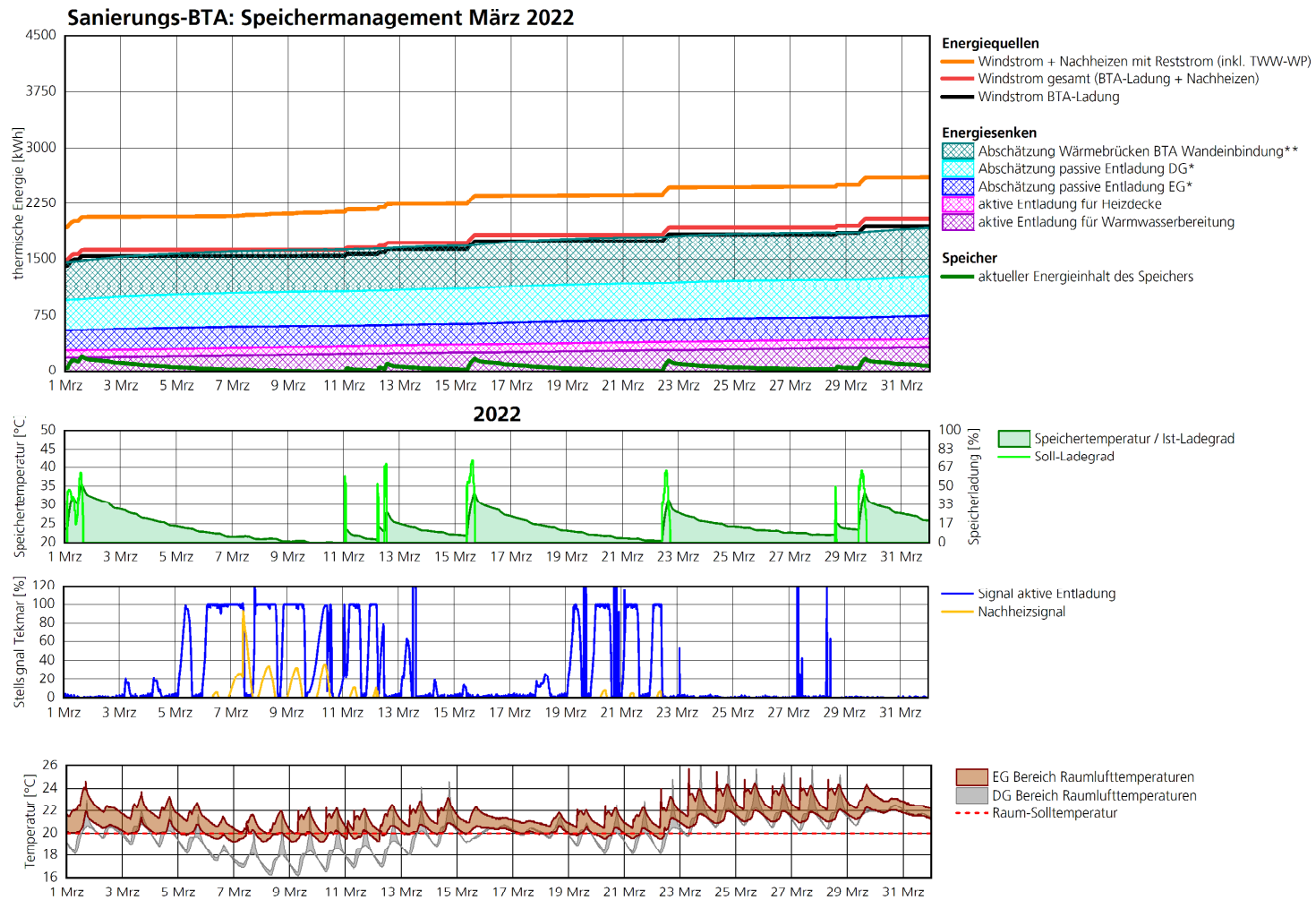


Bild 213:
Kumulierte Energiebilanzen und Regelungsvorgaben für die Sanierungs-BTA im Zwillingshaus für den März 2022.

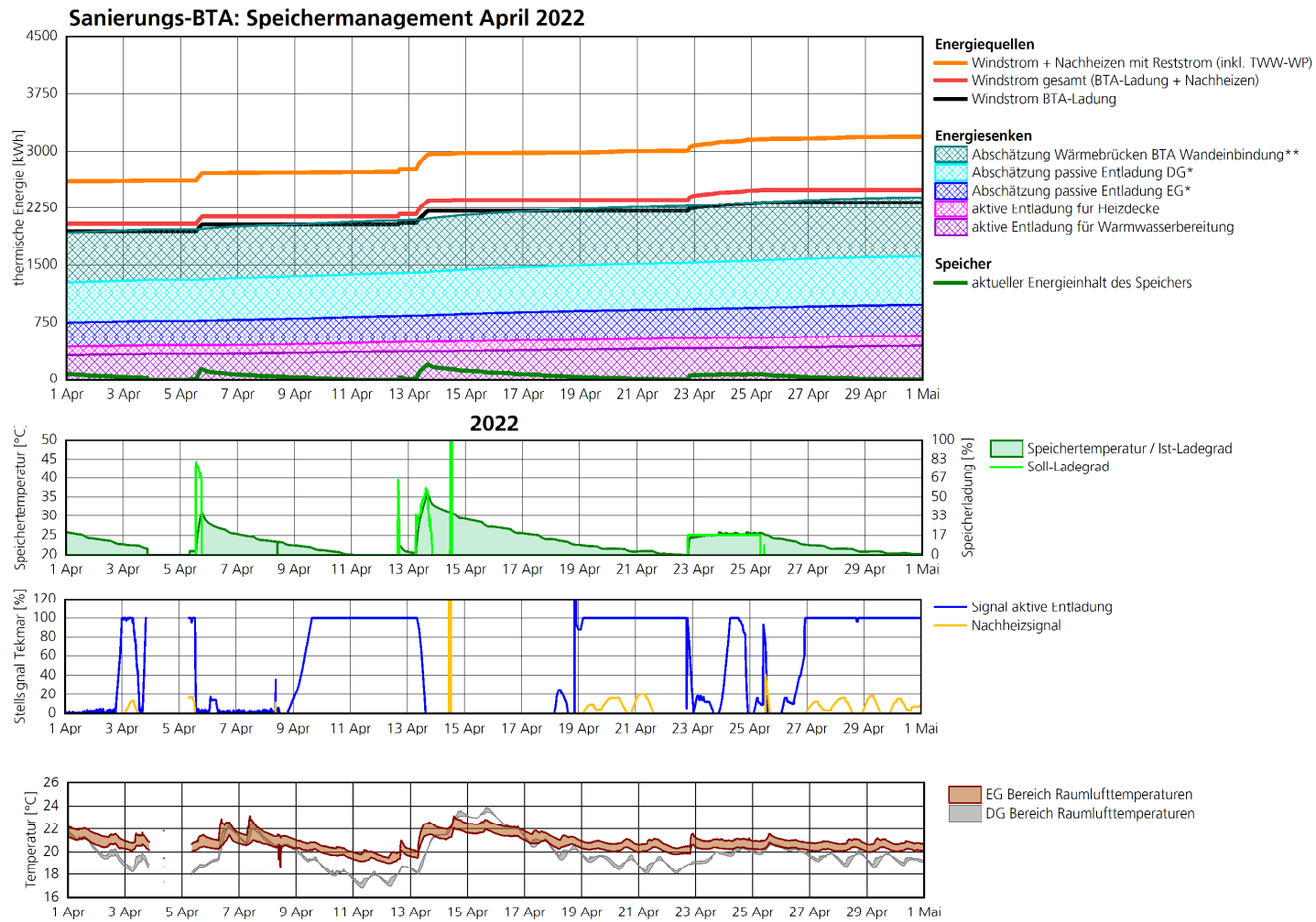


Bild 214:
Kumulierte Energiebilanzen und Regelungsvorgaben für die Sanierungs-BTA im Zwillingshaus für den April 2022.

Nach Abschluss der Messungen wird im Mai noch ein Versuch mit einer Vorlauftemperatur (VLT) der BTA-Ladung von 80 °C gefahren. Hiermit sollen die möglichen Beladeleistungen nochmals erhöht und gleichzeitig die Temperaturgrenzen der eingesetzten Materialien getestet werden. Aufgrund der direkt elektrischen Wärmebereitung sind durch das erhöhte Temperaturniveau (VLT 65 °C auf VLT 80 °C) keine nennenswerten Effizienzeinbußen zu erwarten.

6.2.3 HTSS / Zwillingshaus

Die Darstellung der Energiebilanzen und des Regelungsverhaltens für den HTSS in Bild 215 ist vergleichbar mit der entsprechenden Darstellung für die NeubaubTA in Bild 207, allerdings verfügen beide Zwillingshäuser zusätzlich über eine TWW-Bereitung, welche entsprechend in den kumulierten Energiesenken als lila schraffierte Fläche ergänzt ist. Im oberen Kurvenfenster in Bild 215 sind die kumulierten Energiequellen und –senken des HTSS, sowie der aktuelle (nicht-kumulierte) Speicherinhalt dargestellt. Hierbei gibt die schwarze Linie wieder die in den HTSS eingespeicherte Wind- bzw. Überschussstrommenge wieder. Die rote Linie beinhaltet zusätzlich die direkte Nachheizung der Zuluft mittels Windstrom. Die Energiequellen enthalten ebenfalls die bezogenen Reststrommengen, auch wenn diese genau genommen nicht in den Speicher geladen werden. Zusammen mit der Windstrommenge ergibt sich damit die orangene Linie für den gesamten Strombezug (Windstrom + Reststrom). Entsprechend sollten die gestapelten, schraffierten Flächen der Energiesenken, zusammen mit der Differenz des Speicherinhalts (Monatsanfangswert minus Füllstand zum Betrachtungszeitraum (z.B. Monatsende); dunkelgrüne Linie im oberen Kurvenfenster), die schwarze Linie der BTA-Ladung erreichen, nicht aber die rote oder orange Linie, welche die Energieströme repräsentieren, die nicht in den Speicher geladen werden. Die Differenz zwischen der roten und der orangenen Linie repräsentiert den Reststrombezug. Anhand der sprunghaften Anstiege bei den Energiequellen und dem Speicherinhalt kann man erkennen, wann der HTSS bei Überschussstromsignalen geladen wird. Das aus der Überschussstromverfügbarkeit resultierende Soll-Ladegrad-Signal für den Speicher (hellgrüne Linie) und der aktuelle Ist-Ladegrad bzw. die aktuelle Speichertemperatur (dunkelgrüne, gefüllte Linie) sind im zweiten Kurvenfenster von oben dargestellt. Im dritten Kurvenfenster sind die Signale für die aktive Entladung des Speichers (blau) und für das Nachheizen mit Reststrom (orange) aufgezeigt.

Nach den Beladephase mit steigendem Ist-Ladegrad sinkt die Speicherladung wegen der Wärmebedarfsdeckung des Gebäudes wieder ab. Tendenziell ist diese passive Entladung, die dem Gebäude über die Spülluft zugeführt wird größer, wenn der Speicher wärmer ist und sinkt, wenn sich der Ist-Ladegrad bzw. die Speichertemperatur reduziert. Ist der Ist-Ladegrad so gering, dass die passive Entladung den Wärmebedarf nicht mehr decken kann, wird die aktive Entladung durch den Speicherkern (blau, drittes Kurvenfenster) aktiviert und der Speicher entlädt sich wieder schneller. Eine graphische Aufgliederung der passiven und der aktiven Entladung, wie in den bisherigen Auswertungen zu den BTA-Systemen, ist hier konstruktionsbedingt nicht möglich.

Am Unterschied zwischen der roten und orangen Linie (oberes Kurvenfenster)

kann man erkennen, dass der HTSS im Januar kaum Reststrom benötigt. Messtechnisch kann, wie bereits erwähnt, nicht zwischen der passiven Entladung über die Spülluft und aktiver Entladung über die Kernluft unterschieden werden. Beide Wärmemengen zur Gebäudebeheizung sind in der magenta-schraffierten Fläche (Entladung Heizung, oberes Kurvenfenster) kumuliert. Die ungewollten Rohrleitungsverluste des gedämmten Heißluftkreises in den Aufstellkeller (rote Schraffur) sind sehr gering. Die HTSS-Entladung zur TWW-Bereitung ist als lila Schraffur kumuliert. Der Notheizstab, der bei entladener HTSS TWW aus Reststrom bereitet, kommt so gut wie gar nicht zum Einsatz.

Die von der Regelung gesetzten Soll-Ladegrade sind zielführend, da die Ist-Ladegrade an den drei Tiefstständen im Januar mit etwa 5 -25 Prozent relativ niedrig sind. Bis zum 26. Januar war im HTSS-Haus eine Nachtabsenkung auf 15 °C aktiv. Die über die Luft übertragbare Wärmemenge in die Räume ist jedoch zu gering, um die Raumlufttemperaturen schnell genug wieder anzuheben. Hieraus resultieren ebenfalls die Nachheizsignale (orangene Linie, drittes Kurvenfenster) trotz ausreichender Speicherladung. Folglich sollte bei dem HTSS eine Nachtabsenkung nur dann vorgenommen werden, wenn zusätzlich zur Zuluftheizung eine hydraulische Flächenheizung - über den Luft-Wasser-Wärmetauscher bzw. den Warmwasser-Pufferspeicher - angebunden ist.

Die Raumlufttemperaturen sind im Januar 2022 wegen der Nachtabsenkung bzw. deren Nachwirkungen noch nicht repräsentativ. Auch werden bis Ende Januar noch Optimierungen an der Berechnung des Nachheizsignals vorgenommen.

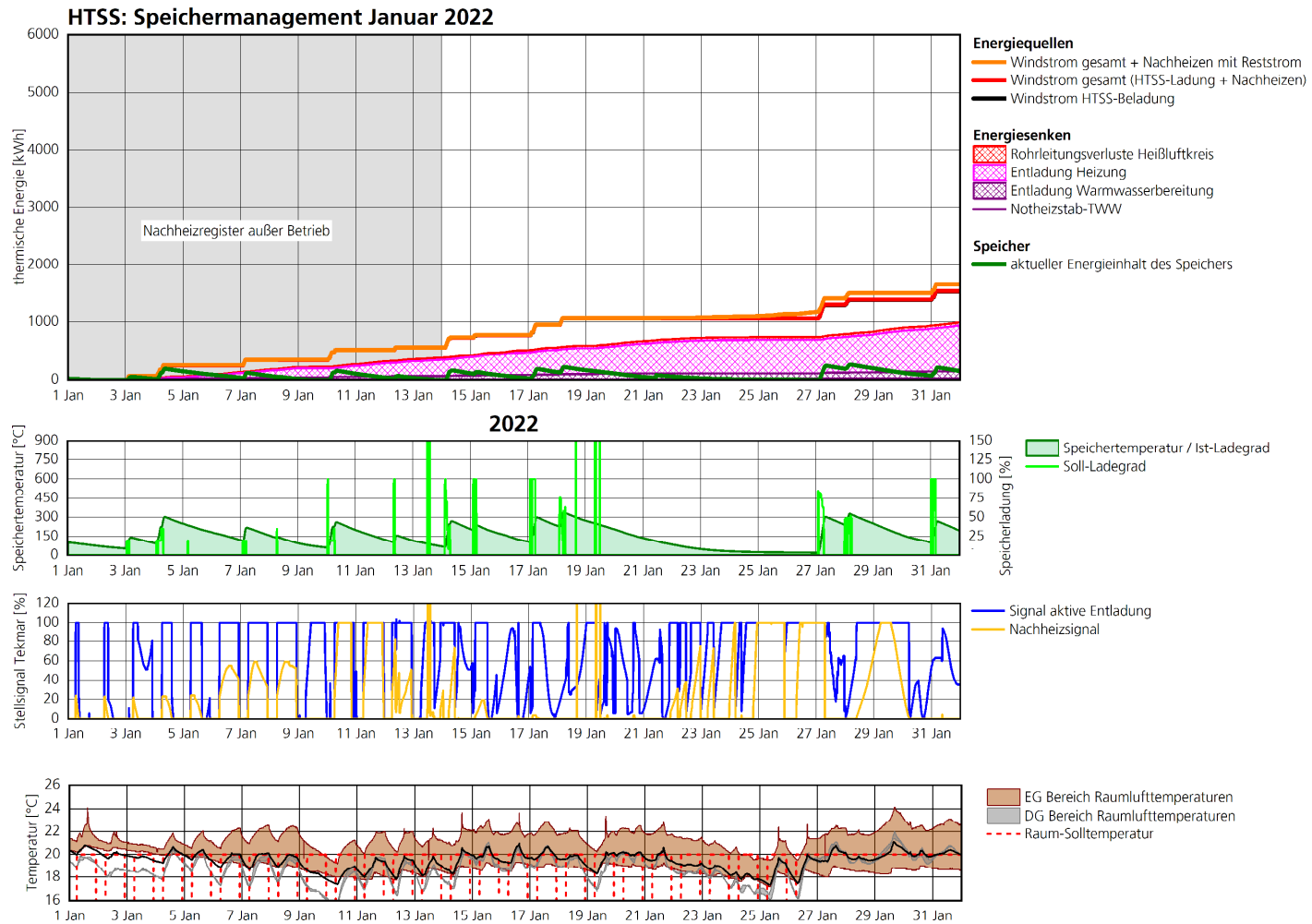


Bild 215:
Kumulierte Energiebilanzen und Regelungsvorgaben für den HTSS im Zwillingshaus für den Januar 2022.

Wegen der Kern- und Spülluftvermischung wurde der HTSS nachträglich mit dem Speicher-Bypass ausgestattet, der es der Regelung ermöglicht, den HTSS mit dem Heißluftkreis vollständig zu umgehen. Aus diesem Grund – und da der HTSS im Versuch im Keller, außerhalb der wärmetauschenden Hüllfläche aufgestellt ist – gelangen beim Überladen des Speichers keine Wärmeverluste in die beheizten Räume. Entsprechend überwärmen sich die Räume bei einer Speicherüberladung nicht. Somit existiert bei diesem Prototyp das in Abschnitt 6.3.3 diskutierte Problem der fehlenden Rückmeldung an die Regelung bei Speicherüberladung auch in physikalischer Hinsicht. Im Februar (Bild 216) beginnt sich die fehlende Rückmeldung bei Überladung des Speichers auszuwirken. Der Soll-Ladegrad beträgt meistens 100 Prozent. Wegen der langen Überbrückungszeiten im ersten Drittel des Februars wird der HTSS von 100 Prozent bis auf knapp 10 Prozent entladen. Aufgrund der hohen Speichertemperaturen kommt es zu hohen Wärmeverlusten in den Aufstellraum (Keller), welche im Vorfeld so nicht erwartet wurden. Eine messtechnische Erfassung der Verluste war aufgrund der sehr inhomogenen Temperaturverteilung auf der Außenfläche des HTSS nicht möglich. Eine Abschätzung der Verluste ist somit lediglich aufgrund der Differenz zwischen eingespeicherter und entladener Energiemenge möglich. Gegen Ende Februar summieren sich die Verluste in den Aufstellraum auf über 50 Prozent (Differenz rote bzw. schwarze Linie und kumulierte Energiesenken, oberes Kurvenfenster)

Da es in diesem Zeitraum vom 2. – 9. Februar kaum Nachheizereignisse gibt, kann man hieraus ableiten, dass der HTSS - trotz der unplanmäßigen, nicht-nutzbaren Speicherverluste im Keller – bei dem aktuellen Prototyp in einem durchschnittlichen Kernwinter ca. 7 Tage überbrücken kann.

Nach einer Optimierung der Regelung Ende Januar stabilisieren sich die Raumlufttemperaturen im Laufe der ersten Februartage. Im Erdgeschoss (EG) liegen diese dann planmäßig größtenteils oberhalb der Solltemperatur von 20 °C, in einem Korridor von 2 K. Die Temperaturen im Dachgeschoss sind aber auch beim HTSS ca. 2 K zu niedrig. Dies ist auch hier darin begründet, dass das Dach des Zwillingshauses nicht ganz den Passivhausstandard erreicht.

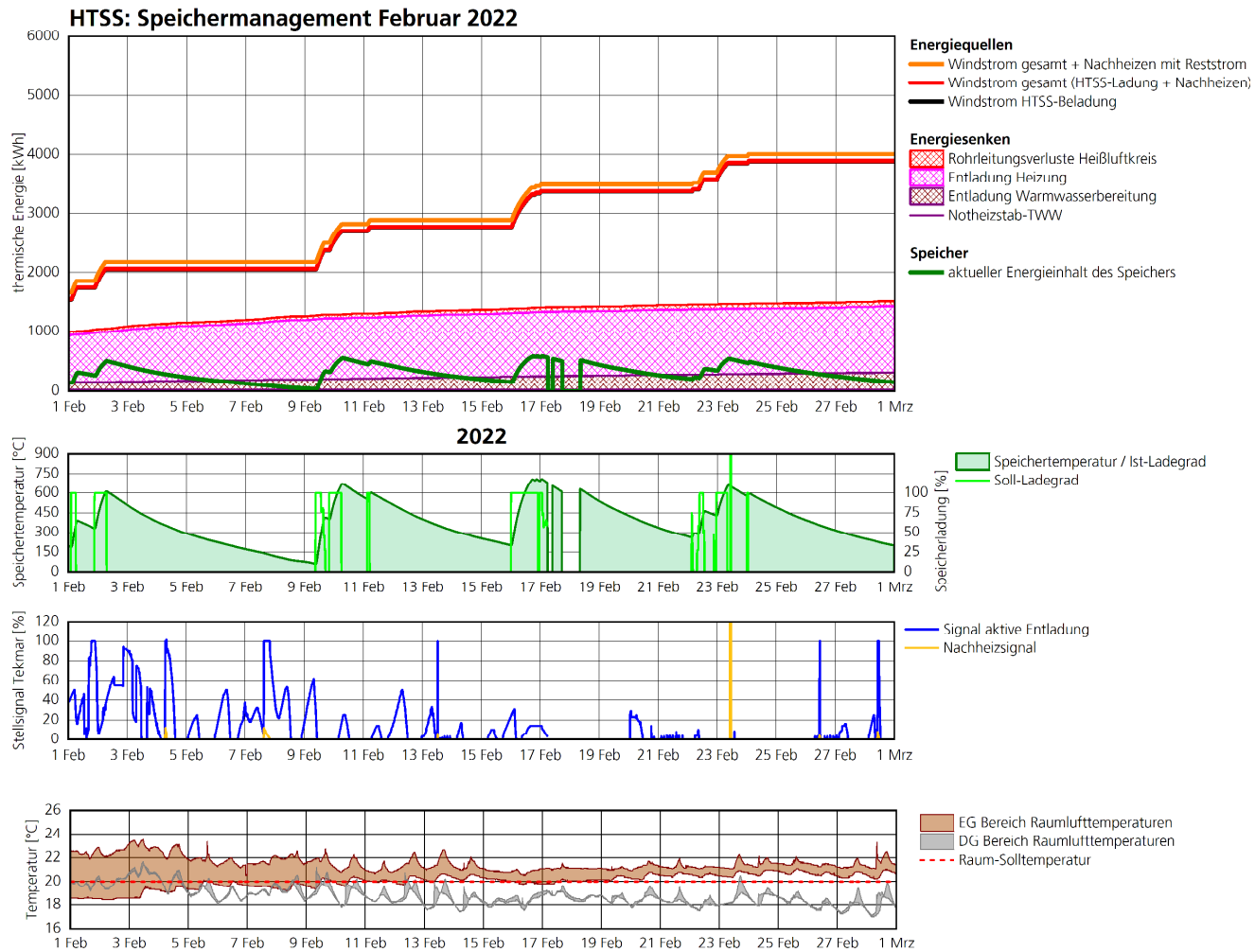


Bild 216:
Kumulierte Energiebilanzen und Regelungsvorgaben für den HTSS im Zwillingshaus für den Februar 2022.

In Bild 217 ist das Verhalten des HTSS im März 2022 dargestellt. Es kommt weiterhin zu Überladungen des Speichers. Anfang März kann mit einer Speicherladung von 100 Prozent (ähnlich wie im Februar), trotz der Speicherverluste im Keller, eine erfolgreiche Überbrückung über 10 Tage nachgewiesen werden. Mitte März nähern sich die DG-Temperaturen wegen der steigenden Außentemperaturen dem Sollwert von 20 °C. Der HTSS-Versuch wird am 25.03.2022 vorzeitig beendet, da wie am Anfang dieses Abschnitts erwähnt, die fehlende Rückmeldung einer zu hohen Speicherbeladung physikalisch begründet war. Der April 2022 wurde entsprechend für einige Sonderversuche genutzt, siehe Abschnitt 6.3.1.

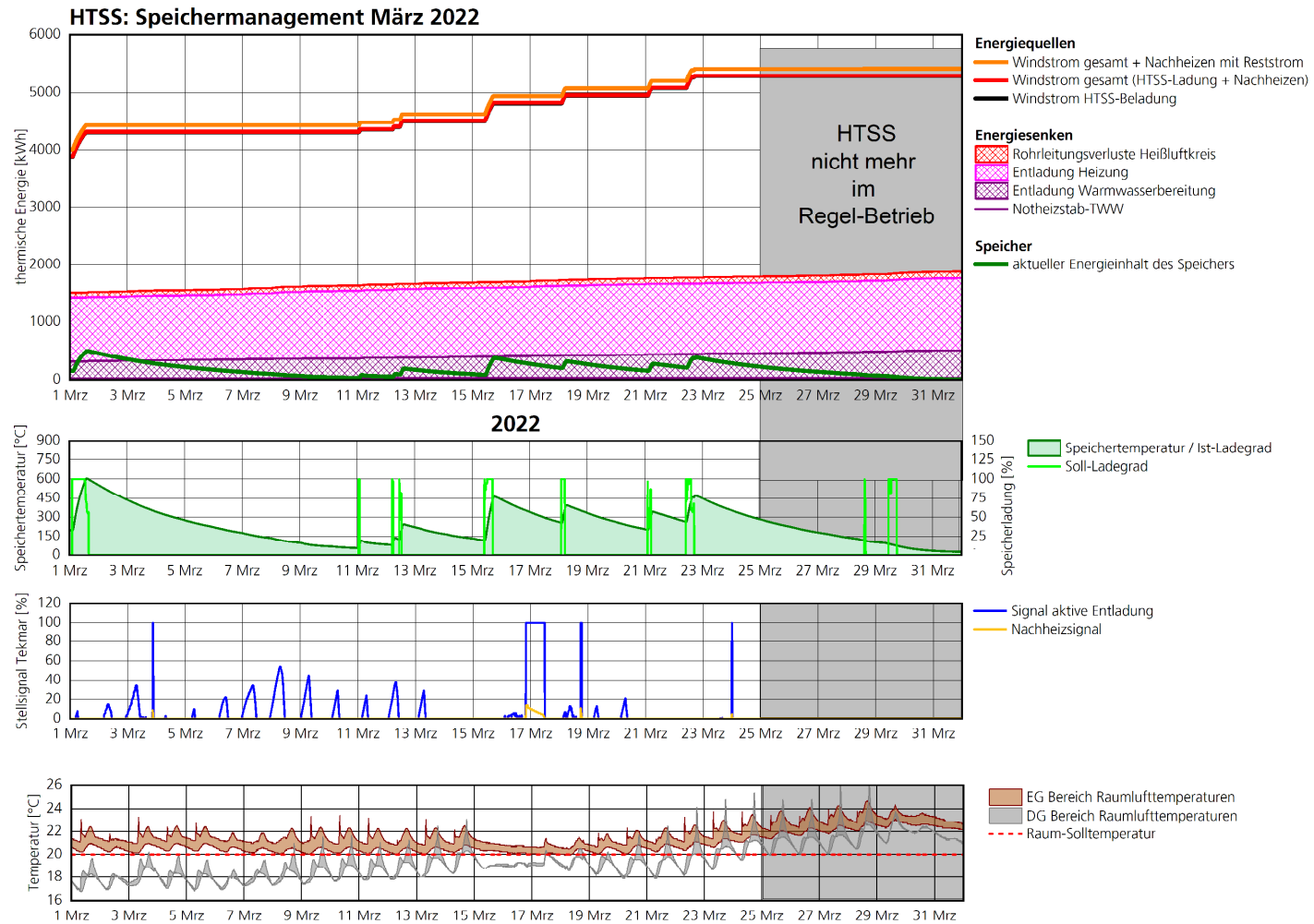


Bild 217:
Kumulierte Energiebilanzen und Regelungsvorgaben für den HTSS im Zwillingshaus für den März 2022.

6.2.4 Überschussstromdeckung

Das zentrale Kriterium für eine erfolgreiche Umsetzung der Windheizung 2.0 ist der Anteil an Wärme für das Gebäude, der aus Wind- bzw. Überschussstrom gedeckt werden kann, also die Windstromdeckung bzw. die Überschussstromdeckung. Bei der Interpretation der entsprechenden Stromanteile aus den Freilandversuchen muss berücksichtigt werden, dass einerseits jeder Versuchsstand über unterschiedliche Bedarf-Speicherkapazität-Verhältnisse verfügt und andererseits die Regelung basierend auf den ersten Ergebnissen aus den laufenden Versuchen noch angepasst bzw. optimiert wurde. Bild 218 zeigt für die vier Messmonate die jeweiligen Anteile der Energiequellen und –senken für den BTA-Neubau (CUBE). Hier wurden die einzelnen über den jeweiligen Monat kumulierten Anteile aufgeschlüsselt dargestellt. Bei den Energiequellen (linker Balken) wird zwischen Wind- bzw. Überschussstrom (dunkelgrau: BTA-Ladung, hellgrau: Nachheizen) und Nachheizen mit Reststrom (gelb) unterschieden. Zusätzlich wird das Speichersaldo zwischen Monatsanfang und –ende (grün) aufgezeigt. Befindet sich dieser grüne Balken auf der Quellenseite, ist der Speicher am Monatsende kühler als am Anfang und enthält entsprechend weniger Energie („negatives Delta“). Ist er auf der Senkenseite, ist er wärmer als am Monatsanfang (Energiezunahme, „positives Delta“). Im rechten Balken werden die Senken aufgeschlüsselt. Hierbei handelt es sich um eine Abschätzung zum Wärmeverlust an die Außenluft (rot), Wärmebrücken der Wandeinbindung (türkis) sowie die passive (hellblau) und aktive (magenta) Entladung. Schwarz schraffiert sind die nicht zuordenbaren Speicherausträge dargestellt. Im Diagramm kann man erkennen, dass der CUBE mit der Neubau-BTA Überschussstromdeckungen von 96 Prozent - 100 Prozent erreicht. An dieser Stelle muss berücksichtigt werden, dass der CUBE über keine TWW-Erwärmung verfügt und dessen Regelung den BTA-Speicher häufig sehr hoch beladen hat, was teilweise zu hohen Raumlufttemperaturen führte.

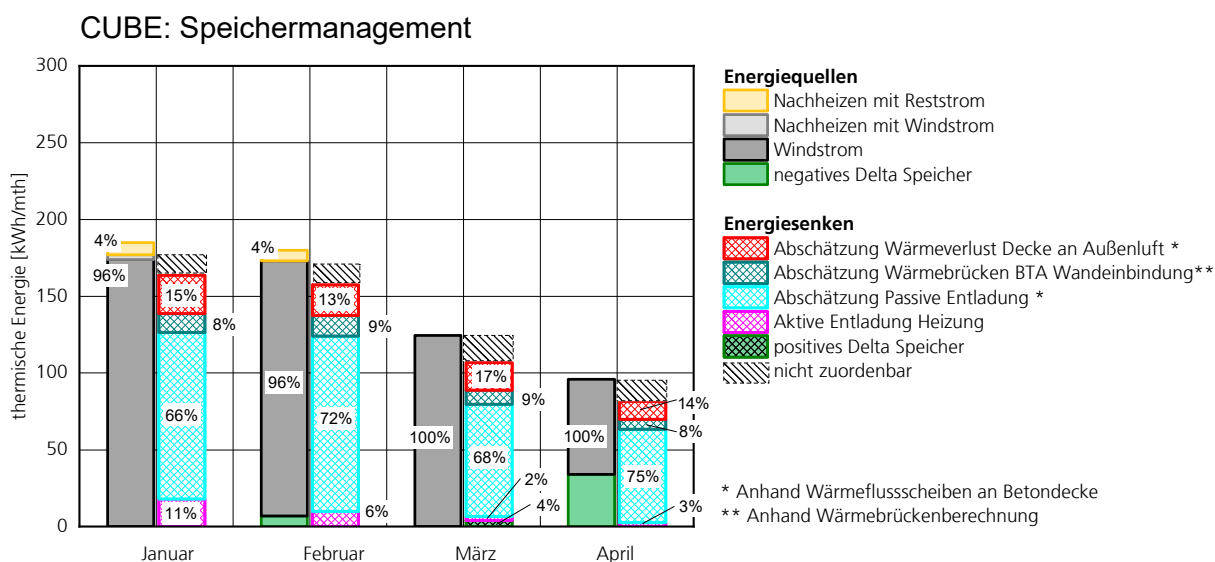


Bild 218:
Aufteilung der Energiequellen und –Senken für die Neubau-BTA (CUBE) für die vier Versuchsmonate Januar bis April 2022.

Bild 219 zeigt, analog zur bereits für die Neubau-BTA beschriebenen graphischen Darstellung, die Energieströme in der Sanierungs-BTA. Neben den bereits genannten Energiequellen, teilen sich die Energiesenken in die Teilbereiche passive Entladung EG (dunkelblau) und OG (hellblau), sowie aktive Entladung für Heizung (magenta) und Trinkwarmwasser (TWW) (lila). Darüber hinaus wird die Abschätzung der Wärmebrücken BTA-Wandeinbindung (türkis) dargestellt. Auf Grund der von der Regelung vorgegebenen zu niedrigen Sollladegrade weist die Sanierungs-BTA im Januar noch eine sehr geringe Überschussstromdeckung von nur 67 Prozent auf. In den restlichen 3 Messmonaten beträgt die Überschussstromdeckung 77 – 87 Prozent. Hierbei entfällt etwa die Hälfte des Reststromverbrauchs (~55 kWh/m_{th}) auf die Wärmepumpe zur TWW-Bereitung, welche mindestens 1-mal täglich zur Warmwasserbereitung aktiviert wird (unabhängig vom Windstromsignal). Somit kann das aktuelle BTA-Konzept der Windheizung 2.0 in den Wintermonaten keine Überschussstromdeckung von über ~90 Prozent erreichen. Ein alternatives Konzept zur weiteren Erhöhung der Überschussstromdeckung könnte der Einsatz einer solarthermischen Anlage zur TWW-Bereitung darstellen, v.a. wenn die gesamte Jahresperiode betrachtet wird; der solarthermische Beitrag für das TWW ist in den Monaten Dezember und Januar in Deutschland allerdings sehr gering.

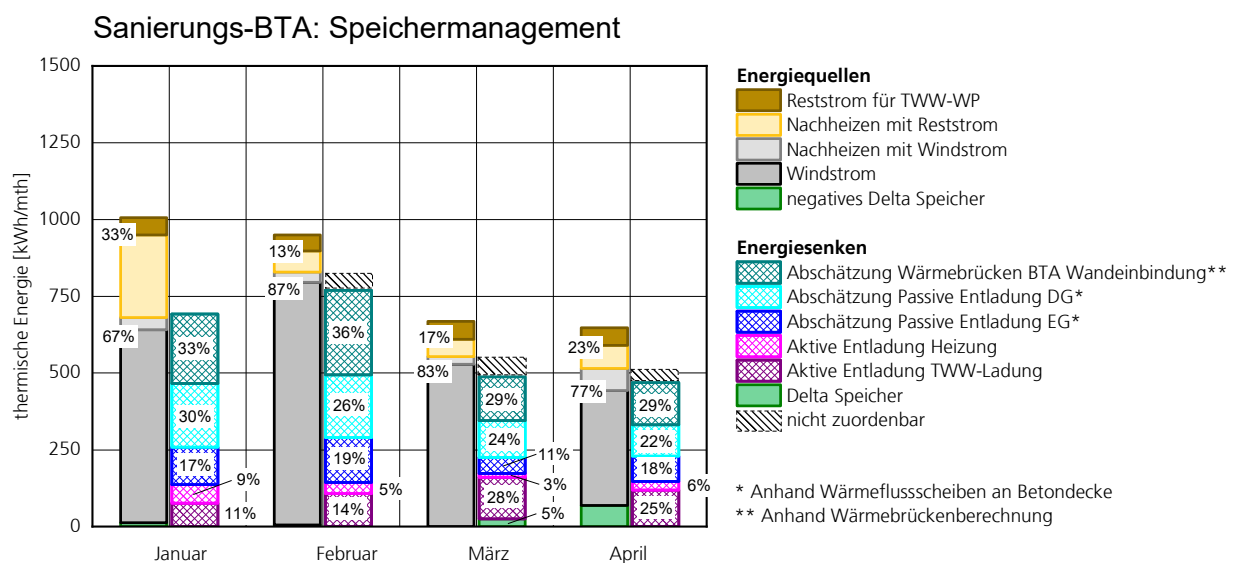


Bild 219: Aufteilung der Energiequellen und –Senken für die Sanierungs-BTA (N2-Zwillingshaus) für die vier Versuchsmonate Januar bis April 2022.

Abweichend von den bereits erwähnten BTA-Varianten teilen sich die Wärmesenken beim HTSS in die Teilbereiche Entladung für Raumheizung (magenta) und TWW (lila) sowie in die Verluste des Heißluftkreises (türkis). Da am HTSS das Temperaturniveau deutlich höher ist, kann die TWW-Bereitung hier direkt, d.h. ohne eine TWW-Wärmepumpe und ohne entsprechende Reststromanteile erfolgen. Der HTSS ist damit in der Lage auch inkl. TWW Überschussstromdeckungen bis zu 100 Prozent zu erreichen, wie Bild 220 entnommen werden

kann. Es muss allerdings berücksichtigt werden, dass der HTSS im Versuch während der Monate Februar und März durch die fehlende Temperaturreckkopplung der Regelung stark überladen wurde, wodurch die Verluste an den Aufstellraum (Keller) noch erhöht wurden. Die Speicherverluste in den Keller im Januar erklären sich durch den thermischen Kurzschluss der Kern- und Spülluft am aktuellen HTSS-Prototypen.

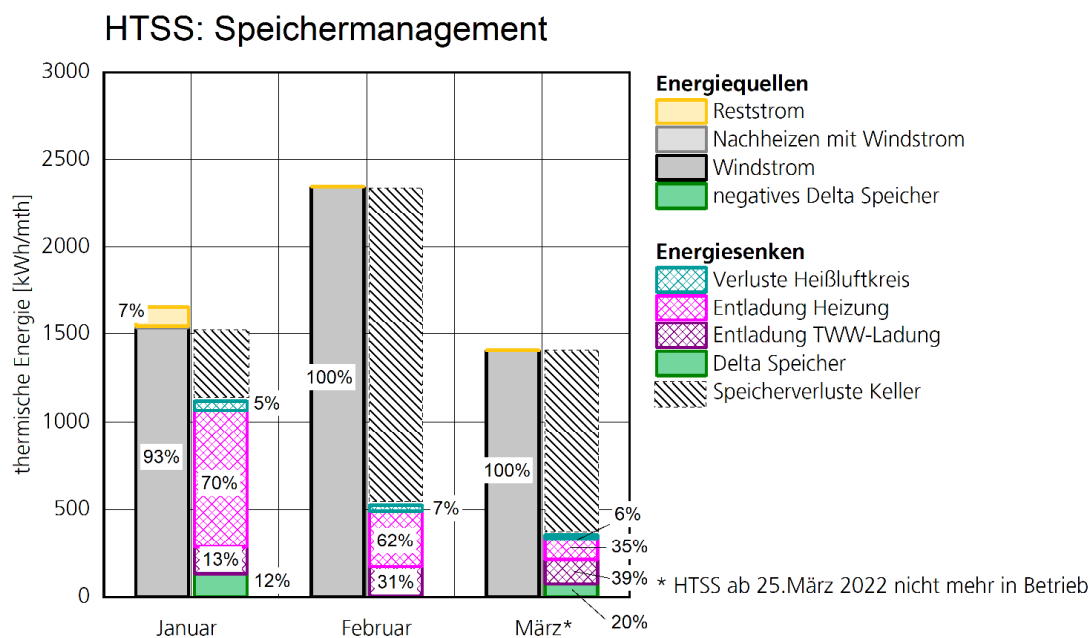


Bild 220: Aufteilung der Energiequellen und –Senken für HTSS für die drei Versuchsmo-nate Januar bis März 2022. Die Speicherverluste in den Keller im Januar erklä-ren sich durch den thermischen Kurzschluss der Kern- und Spülluft am aktuel-len HTSS-Prototypen. Zudem wurde durch die fehlende Temperaturreckkoppe-lung der Regelung während der Monate Februar und März der HTSS stark über-laden, wodurch die Verluste an den Aufstellraum (Keller) noch erhöht wur-den.

6.3 Beladeverhalten der Speicher

Da ein Windheizung 2.0 Gebäude in kurzer Zeit hohe elektrische Leistungen aufnehmen muss, ist das Verhalten bzw. die möglichen Beladeleistungen der Speichersysteme eine wesentliche Eigenschaft, die in diesem Abschnitt unter-sucht wird. Ebenfalls wird die Frage behandelt, bis zu welchen minimalen Spei-chertemperaturen bzw. Ist-Ladegraden noch Wärme entnommen werden kann.

6.3.1 HTSS

Die Ist-Temperatur des HTSS wird basierend auf 8 Messstellen entlang einer vertikalen Achse durch die Speichermitte gemessen. Drei dieser Thermo-ele-mente sind im Verlauf der Versuche ausgefallen und wurden aus der Messung und Regelung entfernt. Zur Ermittlung des Ist-Ladegrads werden diese Tempe-raturen in einem Temperaturbereich von 25 °C bis 800 °C auf 0 – 100 Prozent

skaliert. Die realisierbaren Beladeleistungen des HTSS sind in Bild 221 in Abhängigkeit von der Speichertemperatur und Ladedauer dargestellt. Es zeigt sich, dass bis zu einer Speichertemperatur von ca. 300 °C annähernd die volle Ladelleistung von 56 kW genutzt werden. Bei höheren Temperaturen sinkt diese annähernd linear auf 20 kW bei einer Kerntemperatur von 700 °C ab (schwarze Linie), da der heiße Stein die Wärme der Heizwendel (1000 °C) wegen des geringeren Temperaturunterschieds langsamer abführt. Entsprechend wird weniger Leistung benötigt, um die Heizwendeln auf ihrer Solltemperatur zu halten. Mit steigender Kerntemperatur gehen längere Beladedauern einher. Die Punkte unterhalb dieser Linie repräsentieren Systemzustände bei denen der HTSS einen Sollladegrad unter 100 Prozent bereits erreicht hat und nun die Temperatur konstant hält. Punkte mit kurzer Ladedauer (rot) oberhalb dieser Linie entstehen, wenn eine Ladephase nicht durchgehend ist, sondern das Signal im 1 – 2 Stunde-Zyklus an- und abschaltet. Dann kann hier kurzzeitig auch bei höheren Kerntemperatur eine höhere Leistung eingebracht werden, da das Material direkt um die Wendel, anders als beim konstanten Aufheizen, lokal etwas abgekühlt ist und sich dadurch die Wärmeabgabe der Heizwendel entsprechend erhöht.

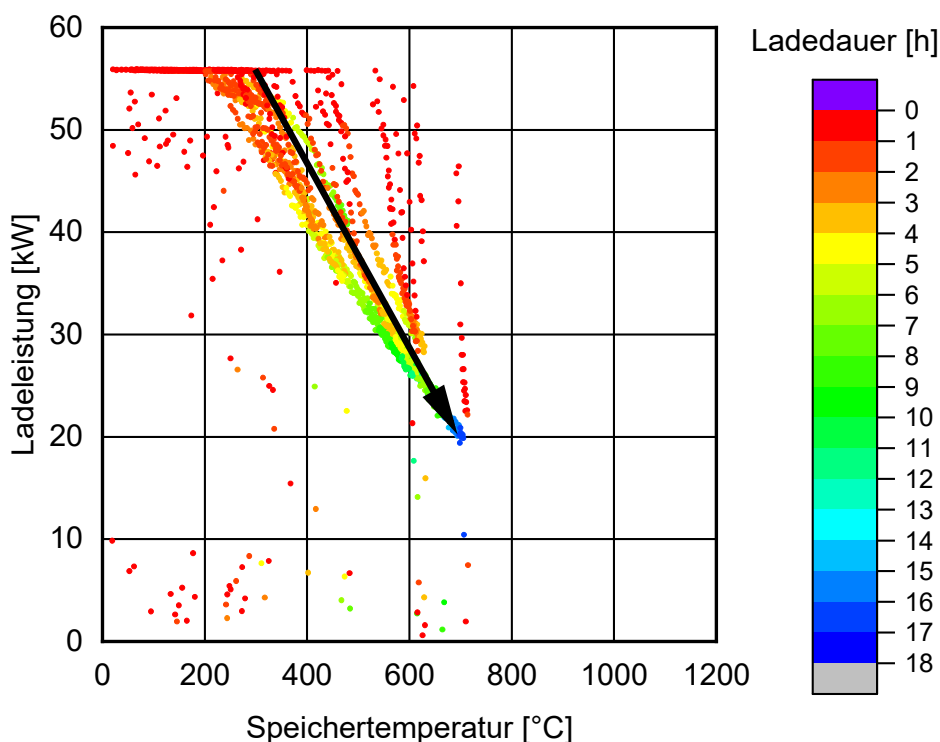


Bild 221:
Beladeleistung in Abhängigkeit der HTSS-Temperatur und der Beladedauer.

Eine potentielle ökonomische Optimierung des HTSS wäre es, weniger Heizwendeln einzubauen, diese aber dafür mit einer höheren Leistung und Grenztemperatur zu betreiben. Am Ende der Heizperiode 2021/22 werden entsprechende Versuche durchgeführt. Hierbei wird eine einzelne Wendel verwendet

und die sowohl die Aufheizgeschwindigkeit der Wendel sowie des umgebenden Kernmaterials als auch die Reduktion der elektrischen Leistung bei Erreichen der Wendelmaximaltemperatur bewertet. Zunächst wird als Basis dieses Vergleichs eine Wendel identisch zum Betrieb während des Messwinters mit 3 kW betrieben (siehe Bild 222). Man kann erkennen, dass während der ca. 2:45 Stunden langen Beheizung der einzelnen Wendel mit 3 kW eine Temperatur von 600 °C an der Wendel selbst erreicht wird. Die Temperatur- bzw. Leistungsbegrenzung tritt entsprechend nicht auf. An den Messstellen ca. 10 cm seitlich der Wendel ist eine Temperaturerhöhung auf ca. 130 °C erkennbar, weiter entfernte Messstellen bleiben unbeeinflusst.

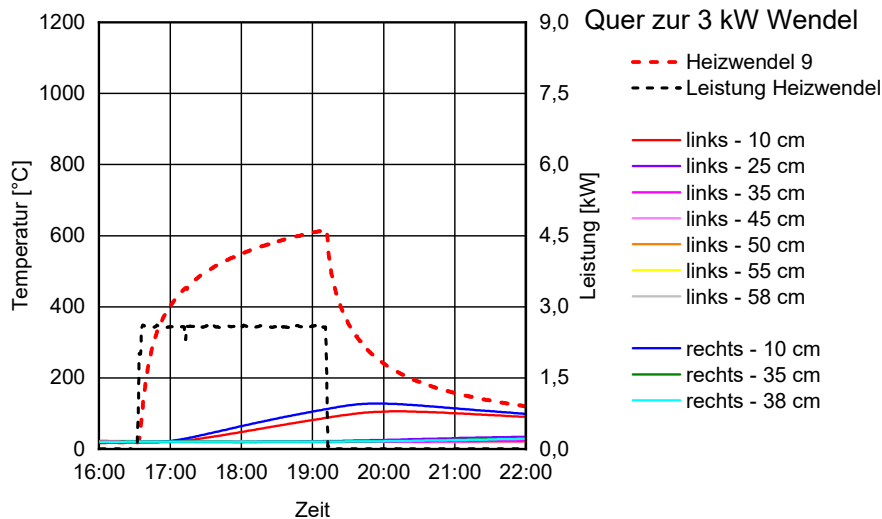


Bild 222: Leistungs- und Temperaturverlauf quer zur Längsachse einer 3 kW Heizwendel.

Der in Bild 223 abgebildete Leistungsverlauf zeigt, dass eine 7 kW-Wendel innerhalb von ca. 2 Stunden die gewählte Grenztemperatur von 1300 °C gerade noch nicht erreicht. Die quer zur Heizwendel liegenden Messpunkte im Kernmaterial mit einem Wendelabstand von 10 cm erreichen ca. 220 °C, weiter entfernte Kernmessstellen sind entsprechend kälter. In Bild 224 wird deutlich, dass bei einer Leistung von 9 kW die Maximaltemperatur von 1300 °C bereits nach 16 Minuten erreicht ist und die Temperaturregelung die Leistung drosselt. Da für diesen letzten Versuch eine andere Heizwendel gewählt wurde als bei den beiden vorherigen (HW 2 statt HW 9) sind die nächsten verfügbaren Messstellen ca. 30 cm entfernt. Diese werden durch den relativ kurzen Heizimpuls, ca. 30 Minuten, nicht beeinflusst.

Diese Ergebnisse zeigen, dass eine Erhöhung des Wendelabstands auf Grund der Wärmeleitfähigkeit des gewählten Steins (Speicherkerndmaterial) nicht sinnvoll ist. Eine Erhöhung der Wendelleistung wäre bezüglich des HTSS zwar möglich und sinnvoll, da so auch bei kurzen Schalsignalen mehr Wärme eingespeichert werden könnte. Bei gleichbleibender Wendelanzahl wäre jedoch eine noch höhere Anschlussleistung des Hausanschlusses notwendig.

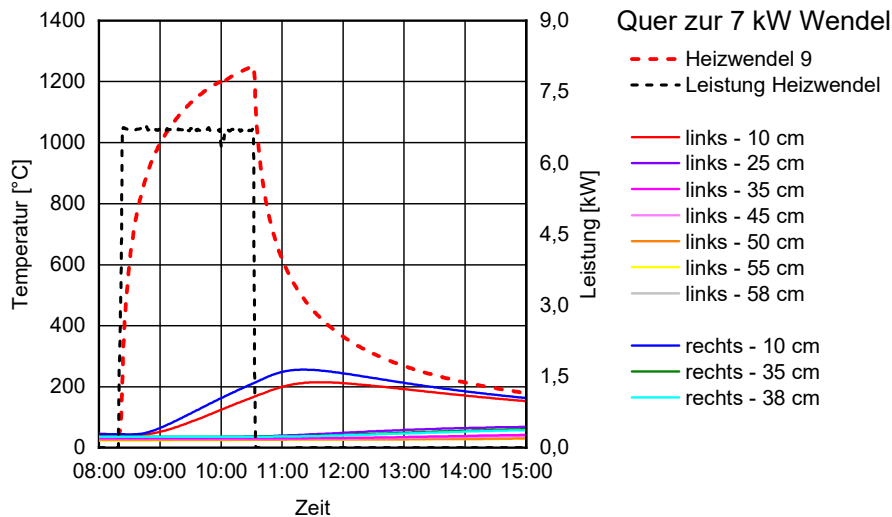


Bild 223:
Leistungs- und Temperaturverlauf quer zur Längsachse einer 7 kW Heizwendel.

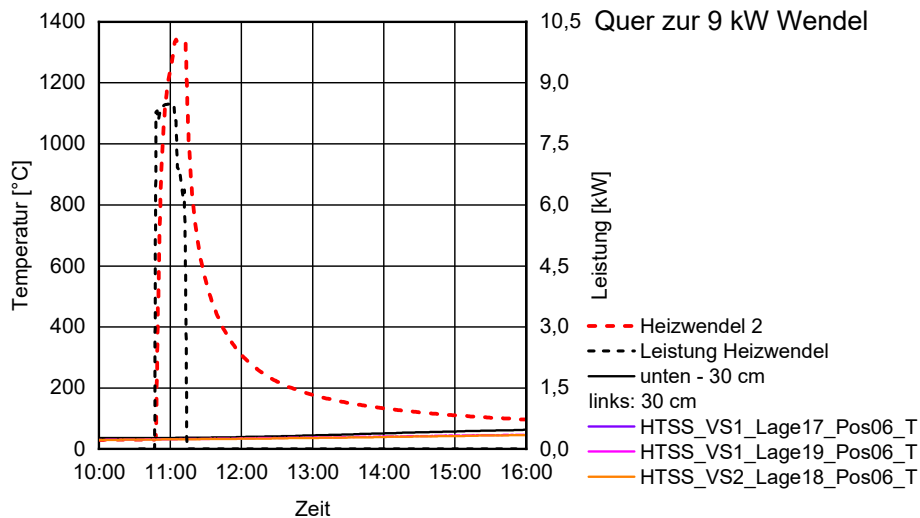


Bild 224:
Leistungs- und Temperaturverlauf quer zur Längsachse einer 9 kW Heizwendel.

Bezüglich der Entladung ist von Interesse, bis zu welcher Entladung bzw. welchem Temperaturniveau dem Speicher noch Wärme entnommen werden kann. Hierbei ist das TWW maßgeblich, da hierfür eine Heißlufttemperatur von 80 °C notwendig ist, während die Leistungsfähigkeit der Zuluftbeheizung zu den Räumen erst ab ca. 55 °C reduziert ist. Zudem werden, wie in Abschnitt 2.1.1 beschrieben, zwei unterschiedliche Luftführungen zur Entladung des Speicherkerns untersucht. Eine Durchströmung des Kerns durch vertikale Kanäle (Kernluft 1) und eine Umströmung der Außenoberfläche des Kerns (Kernluft 2). Beide Systeme verfügen über eine vergleichbare wärmetauschende Oberfläche am Kern. Links in Bild 225 wird deutlich, dass es bezüglich des Temperaturverhaltens keinen signifikanten Unterschied zwischen den beiden Entlademethoden gibt. Beide können eine Heißlufttemperatur von 80 °C bis zu einer Kerntemperatur

von 85 °C bereitstellen. Ebenso wird deutlich, dass die schwankenden Rücklufttemperaturen vor dem Speicher keinen Einfluss auf die Heißlufttemperatur nach dem HTSS haben. Rechts in Bild 225 kann, v.a. im Temperaturbereich zwischen 50 – 75 °C, entnommen werden, dass die Kernumspülung auch vergleichbare Entladeleistungen erreichen kann. Die Leistungspunkte unterhalb der Kernluft 1-Linie bedeuten nicht, dass keine höheren Leistungen möglich sind, sondern dass diese Leistungshöhe im Versuch, bei Vorliegen dieses Temperaturbereich, nicht abgerufen wurden. Eine lineare Interpolation des Kernluft 2-Verhalten zwischen 50 – 75 °C ist zulässig. Heißlufttemperaturen oberhalb von 90 °C können nicht verwendet werden, da dies im Luft-Wasser-Wärmetauscher der TWW-Bereitung zu Dampferzeugung führen würde.

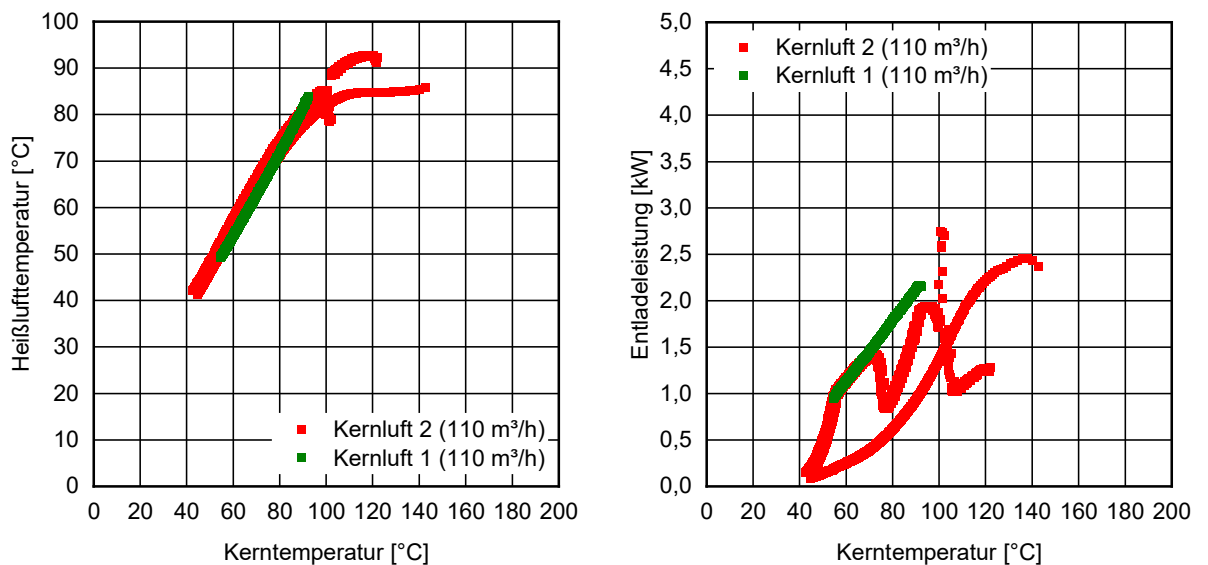


Bild 225:
Erreichbare Heißlufttemperatur am Speicherauslass (links) und erreichbare thermische Entladeleistungen des HTSS (rechts) in Abhängigkeit von der Temperatur des Speicherkerns für die Kerndurchströmung (Kernluft 1) und die Kernumspülung (Kernluft 2).

6.3.2 BTA

Auch bei der Nutzung einer Bauteilaktivierung als Speicher ist die mögliche Höhe der Beladeleistung ein entscheidender Einflussfaktor. In Bild 226 ist für beide BTA-Systeme die spezifische Beladeleistung in Abhängigkeit von der Temperaturdifferenz zwischen Vorlauf und BTA-Speicher dargestellt. Die Neubau-BTA mit den im Beton eingegossenen Rohren erreicht hier ca. $17 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. Bei der Sanierungs-BTA sind die Rohre bzw. Wärmeleitbleche an den Innenputz an der Deckenunterseite befestigt und erreichen mit etwa $6,5 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ einen deutlich geringen Wert, der jedoch durch eine höhere Vorlauftemperatur kompensiert werden kann. Die durch die Punktfarben repräsentierte Beladedauer bis zum jeweiligen Datenpunkt hat in dieser Darstellung keinen Einfluss.

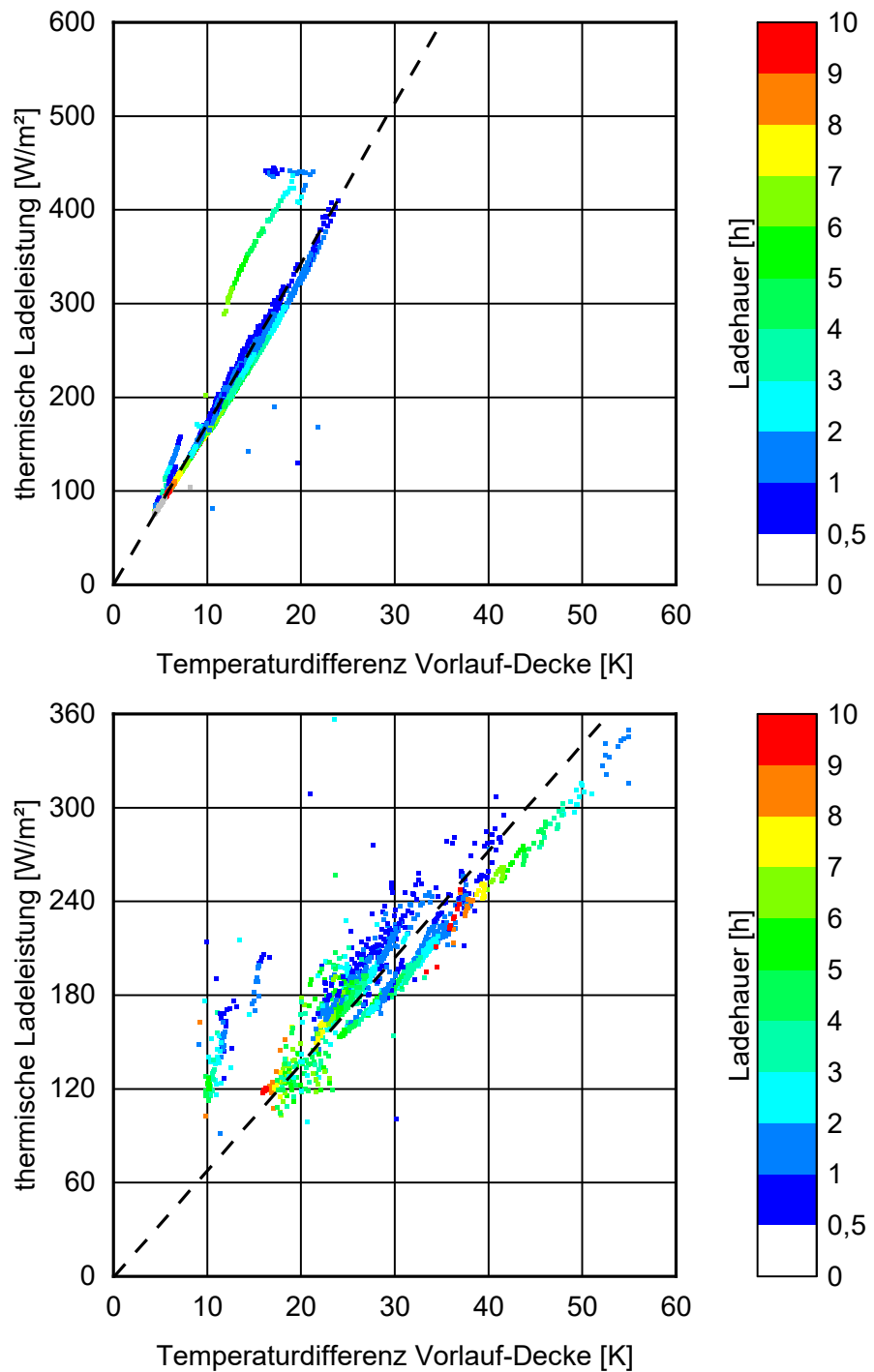


Bild 226:
 Spezifische Ladeleistung in Abhängigkeit von der Temperaturdifferenz zwischen Vorlauf und BTA-Speicher oben für die Neubau- und unten für die Sanierungslösung. Die Dauer der aktuellen Ladezeit ist farblich kodiert.

Oben in Bild 227 ist die spezifische Beladeleistung der Neubau-BTA dargestellt. Diese wird mit einer Vorlauftemperatur von maximal 45 °C betrieben, entsprechend schneidet die Verlängerung der Kennlinie bei 45 °C die X-Achse (0 W/m²). Die im unten in Bild 227 dargestellte Sanierungslösung wurde mit Vorlauftemperaturen von 55 °C (blau), 65 °C (grün) und 80 °C (rot) betrieben. Mit steigender Vorlauftemperatur erhöht sich die spezifische Leistung.

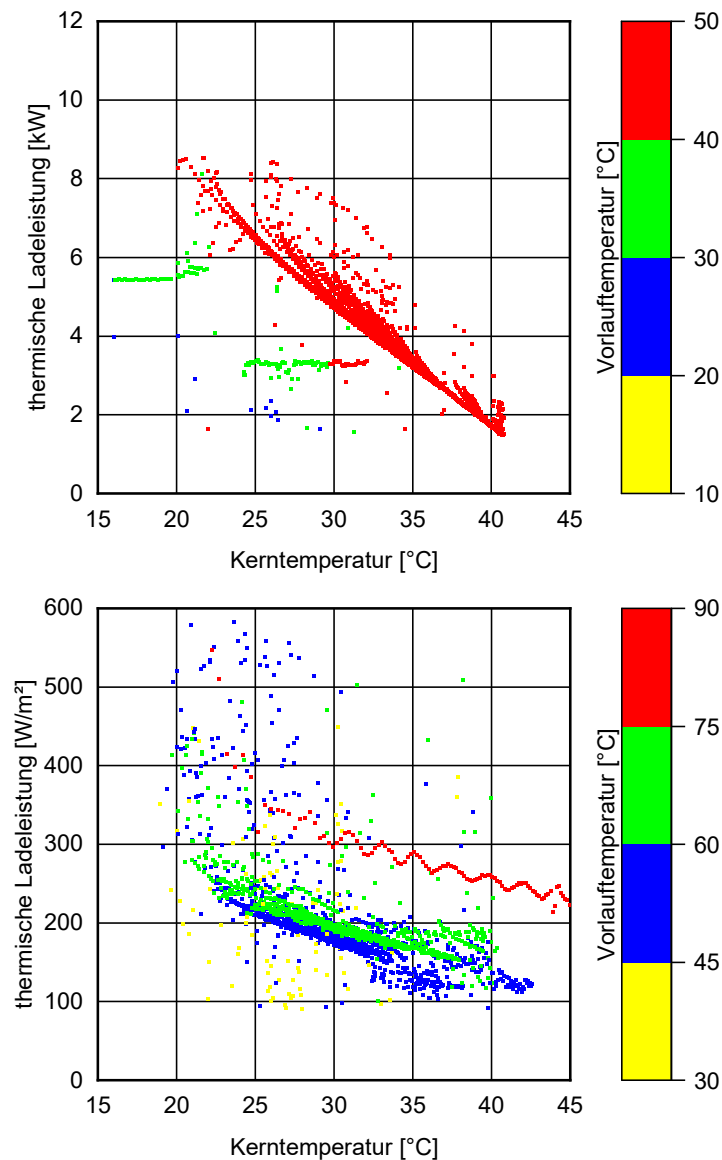


Bild 227:
Spezifische Beladeleistung in Abhängigkeit von der aktuellen BTA-Speichertemperatur und der gewählten Vorlauftemperatur für die Neubau-BTA oben und die Sanierungs-BTA unten.

In Bild 228 kann man für das gesamte Zwillingshaus (Sanierungs-BTA) erkennen, dass unabhängig von der gewählten BTA-Vorlauftemperatur zu Beginn der Ladung Leistungen bis zu 45 kW erreicht werden, innerhalb der ersten 60 Minuten fällt die Ladeleistung allerdings schnell ab. Die Ladeleistung stabilisieren sich dann bei einer Vorlauftemperatur von 55 °C bei 10 – 12 kW, bei 65 °C werden 15 – 18 kW erreicht und bei einer Vorlauftemperatur von 80 °C ergeben sich Ladeleistungen von bis zu 20 – 28 kW

Da der CUBE mit der Neubau-BTA nur aus einem einzelnen Raum besteht (22 m²), werden die Leistungen in Bild 229 auf die Deckenfläche eines Zwillingshauses (100 m²) hochgerechnet. Der BTA-Speicher des CUBE ist bei Ladestart häufig noch wärmer, wodurch die Linien mit geringer Leistung zu Stand kommen. Es werden die obersten Linien bewertet. Die Leistungsgrenze bei ca. 39 kW entspricht der Maximalleistung des verwendeten Heizstabs. Der Leistungsabfall ist hier sowohl deutlich langsamer als auch zeitabhängiger. Bei einer Ladedauer von 2 bis 10 Stunden könnten in ein Gebäude in Zwillingshausgröße Energie einer durchschnittlichen Ladeleistung von 12 – 30 kW eingespeichert werden.

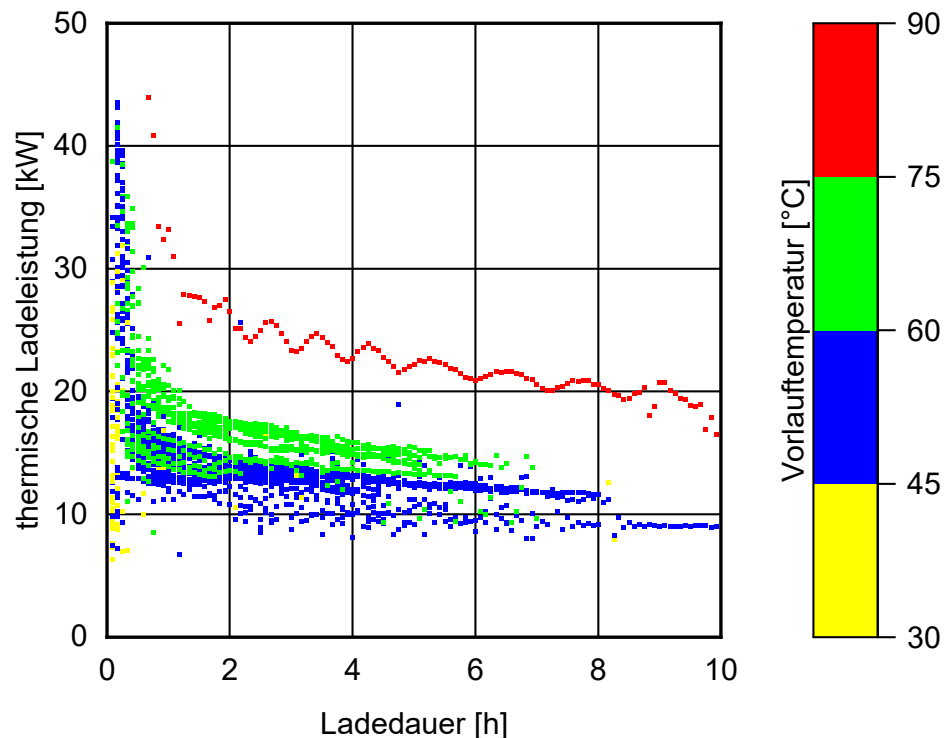


Bild 228:
Absolute Ladeleistung des gesamten Zwillingshauses N2 mit der Sanierungs-BTA in Abhängigkeit von der aktuellen Ladedauer und der gewählten Vorlauftemperatur.

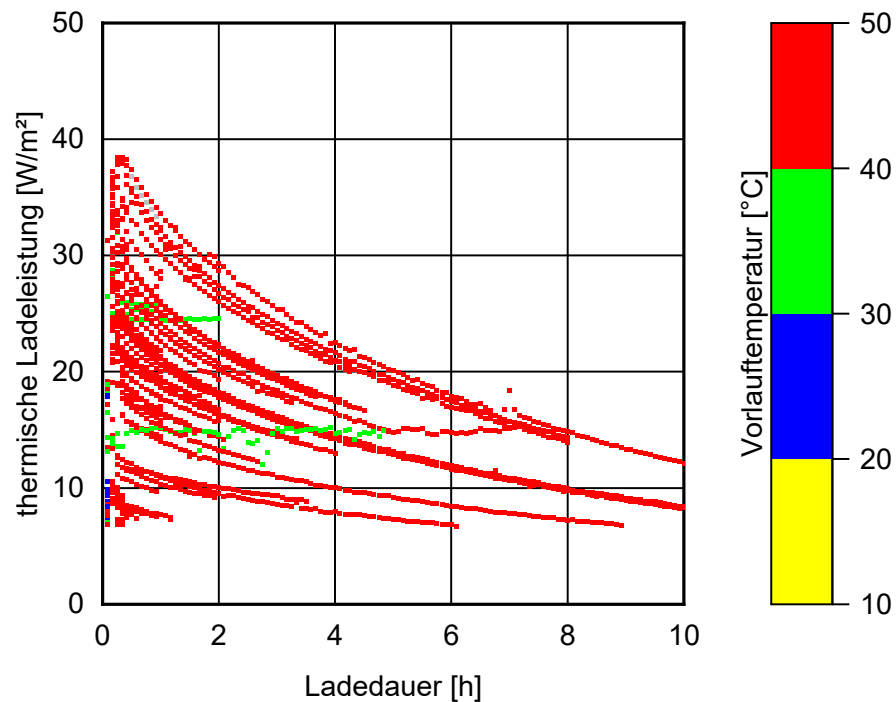


Bild 229:
 Absolute Ladeleistung des CUBE, auf die Deckenfläche des Zwillingshauses extrapoliert, in Abhängigkeit von der aktuellen Ladedauer und der gewählten Vorlauftemperatur.

Vor allem im Sanierungsfall oder bei Ausfall eines einbetonierten Temperaturfühlers bedeutet das nachträgliche Einbohren und Vergießen der Temperaturfühler zur Bestimmung der Speichertemperatur einen gewissen Mehraufwand. Alternativ können etwa in Raummitte angeordnete Oberflächentemperaturfühler auf der Ober- oder Unterseite des Bauteils verwendet werden. Diese haben, wie in Bild 230 erkennbar, eine gute Übereinstimmung mit der Temperatur im Kern selbst (rot, blau, grün). Eine Messung im Randbereich des Bauteils (cyan, orange) ist weniger gut geeignet.

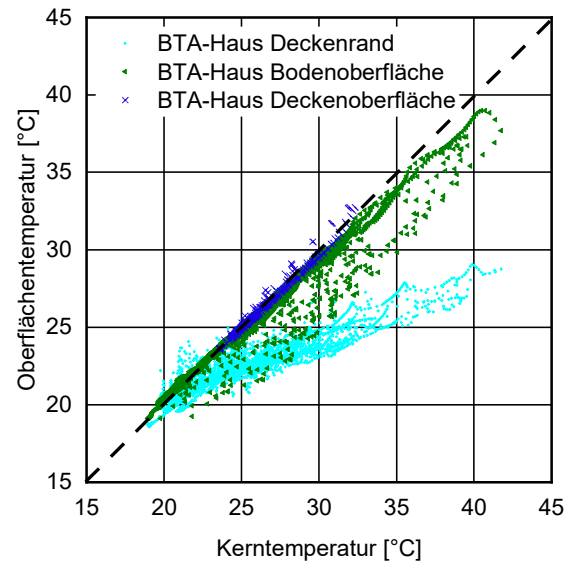
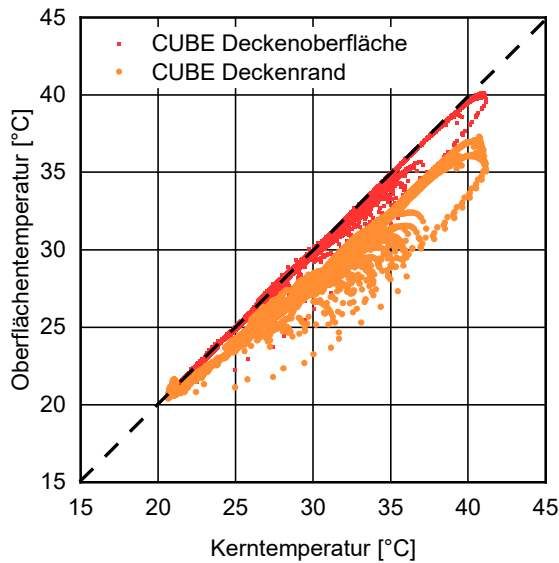


Bild 230:

Zusammenhang zwischen der Kerntemperatur des BTA-Speichers und den einfacher zu messenden Oberflächentemperaturen an der Deckenunterseite, dem Rand der Deckenunterseite und der Deckenoberseite (Boden) des CUBEs mit der Neubau-BTA (links) und der Sanierungs-BTA in Zwillingshaus (rechts).

In Bild 231 wird deutlich, dass bei einer nächtlichen Ladung des BTA-Speicherkerns um 10 K die Raumluft- und –Strahlungstemperaturen nach einem kurzen Anstieg um 0,1-0,2 K sogar wieder abfallen. Die raumseitige Oberflächentemperatur steigt innerhalb der ersten Lade-Stunde von 21 °C auf 22 °C an. Bei der Sanierungslösung (siehe Bild 232) beträgt der Anstieg der Raumlufttemperatur 1 – 2 K, während der Speicher statt bis auf 32 °C auf 55 °C erwärmt wird.

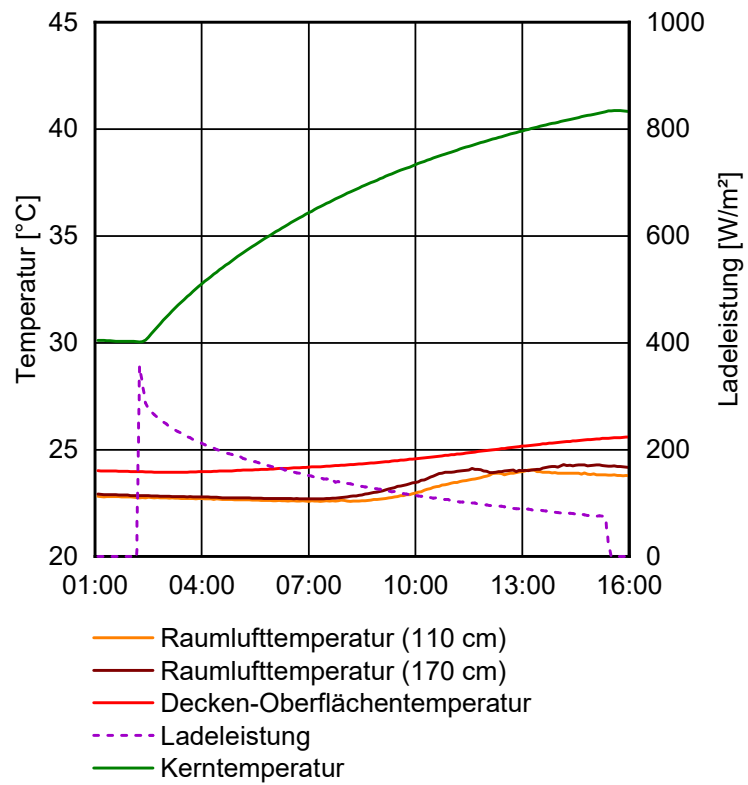


Bild 231:
Unmittelbare Auswirkung des Ladens der Neubau-BTA auf den Raum am
27.01.2022.

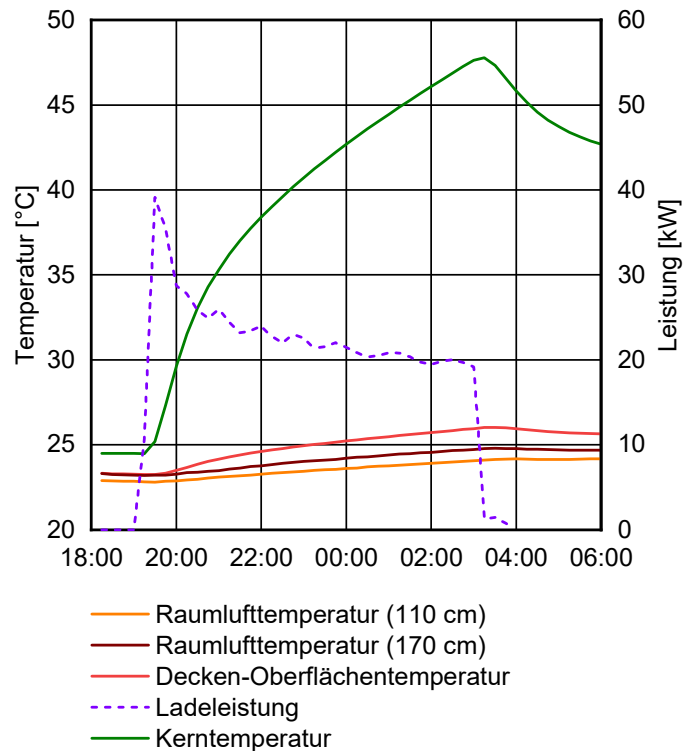


Bild 232:
Unmittelbare Auswirkung des Ladens der Neubau-BTA auf den Raum bei einer Vorlauftemperatur von 80 °C am 2.06.2022.

6.3.3 Optimierungsbedarf Regelverhalten

In Bild 233 ist am Beispiel des CUBE am 2. Februar 2022 zu erkennen, dass das Lagesignal so gering umgesetzt wird, dass wegen des höheren Ist-Ladegrades keine Speicherbeladung ausgeführt wird. Am Ende der folgenden Überbrückungsperiode ist nur noch eine geringe Speicherladung vorhanden; dies entspricht somit dem gewünschten Verhalten. Ab dem 10.02. wird der Speicher dann stets vollständig geladen, obwohl diese Energiemenge nicht zur Überbrückung benötigt wird und die Raumlufttemperaturen entsprechend ansteigen. Dieses Problem besteht v.a. beim CUBE und HTSS, die so viel Energie einspeichern können, dass es zu Überwärmungen kommen kann. Die diesbezügliche Problemanalyse lief bis kurz vor Messende. Final wurde festgestellt, dass es eine Fehlfunktion in dem Mechanismus gab, welcher der Ladeplanung des Speichers eine zu hohe Raumlufttemperatur zurückmeldet. Somit war die Speicherladung nicht in der Lage, korrekt zu berücksichtigen, dass die gespeicherte Wärme zu schnell an den Raum abgegeben wird und der Ladegrad entsprechend begrenzt werden muss. Da für das System keine Überwärmung erkennbar war, erhöhte das System den gewünschten Speicherinhalt, um die Überbrückung zu maximieren. Dieses Problem wurde Mitte April erkannt und bearbeitet, erkennbar an den teils sinkenden Sollladegraden. Eine finale Erfolgsprüfung konnte aus Zeitgründen nicht mehr erfolgen. Entsprechend muss der Erfolg vor Beginn der Demokampagne im Folgeprojekt sichergestellt werden.

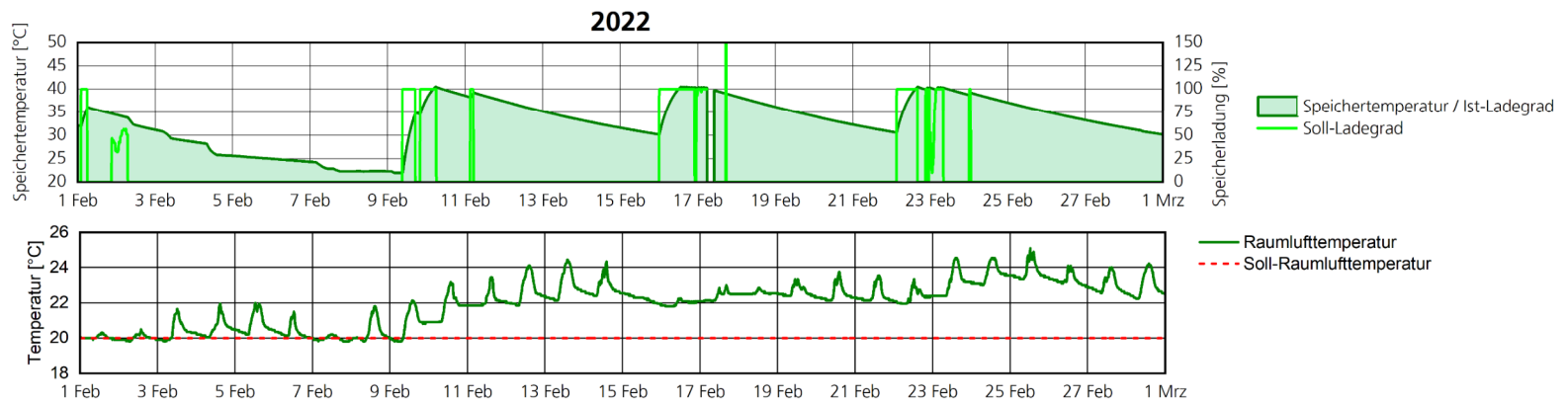


Bild 233:
 Regelverhalten des CUBE im Februar 2022;
 Auszug aus Bild 208. Im oberen Kurvenfenster sind Soll- und Ist-Ladegrad des Speichers dargestellt, im Unteren die Soll- und Ist-Raumlufttemperatur.

6.4 Parameterstudie (Windheizung 2.0-Planungstool)

Zur Evaluation der in das Windheizung 2.0-Planungswerkzeug eingeflossenen Grundlagen für eine technische Auslegung der Windheizungskonzepte, sowie darauf aufbauender ökonomischer bzw. ökologischer Auswertungen, wurden verschiedene Fallbeispiele zu typischen Gebäuden aufbereitet. Für diese wurden mittels des Werkzeuges anhand vorbestimmter Parameter jeweils alternative Windheizung 2.0 Technologien ausgelegt und bewertet. Mit den verschiedenen angesetzten Randbedingungen konnten die vom Tool bereitgestellten Auslegungs- und Bewertungsmethoden durch ein breites Spektrum möglicher Anwendungssituationen ausgeleuchtet werden. Dies ermöglicht zum einen eine Qualitätssicherung der fachlichen Inhalte im entwickelten Werkzeug, wobei mit der stapelweise durchgeführten Erprobung des Werkzeuges anhand der variierten Parameter Unstimmigkeiten und Optimierungspotential aufgezeigt werden konnten. Mit dem somit im Lauf des Prozesses verbesserten Werkzeug konnte dann zum anderen die zielgerichtete Durchführung einer Studie unterstützt werden, welche eine möglichst praxisnahe Darstellung breit aufgestellter Anwendungsszenarien der Windheizung 2.0-Technologien verfolgt. Zweck dieser Studie ist es nicht, alle Aspekte möglicher Windheizung 2.0-Gebäude zu beleuchten. Für Abschätzungen konkreter Fälle steht nun das Planungstool zur Verfügung. Die hier durchgeführte Studie dient einerseits dazu, den Einfluss der veränderten Preisrandbedingungen abzuschätzen und andererseits die nun deutlich besser bekannten energetischen, ökologischen und ökonomischen Einflüsse der BTA und HTSS sowie WWS Speichersysteme zu bewerten.

6.4.1 Randbedingungen

Eingabedaten der Fallbeispiele

Die in der Studie variierten Beispielgebäude, sowie die jeweils angesetzte Windheizung 2.0 Technologien sind in Tabelle 27 dargestellt. Diese Parameter entsprechen dabei den durch einen potentiellen Anwender im Werkzeug beeinflussbaren Randbedingungen der Windheizung 2.0-Auslegung und Bewertung.

Tabelle 27:
Variantenmatrix Parameterstudie (vergleiche auch Anhang A.5).

| | | | | |
|------------------------|-------------------|--------------------|------------------|-------------------|
| Neubau | Leitershofen | Zwillingshaus | RH J (2002-2009) | EFH J (2002-2009) |
| Saniert | san. Leitershofen | san. Zwillingshaus | saniertes RH J | EFH G (1984-1994) |
| Fensteranteil | Lochfassade | Normalfassade | | |
| Windheizung 2.0 | HTSS* | 100 % | 120 % | |
| | BTA | alle Bauteile | nur Decke | |
| | WWS* | 100 % | 120 % | |

*100 % Entsprechen der Windheizung 2.0-Speicherauslegung für Windstromdeckung 90 % (Sanierung: 85 %)

Neben den bereits aus den Vorgängerprojekten behandelten Gebäuden, Zwillingshaus (ZH) sowie Leitershofen (LH), wurden weitere repräsentative Wohngebäude aus der Wohngebäudetypologie des Instituts für Wohnen und Umwelt (IWU) [20] hinzugezogen. Mit den verschiedenen Gebäudetypen konnte eine Bandbreite verschiedener typischer deutscher Bauweisen abgedeckt werden. Ziel war es, dabei möglichst breit die verschiedenen Anwendungsmöglichkeiten der Windheizungstechnik aufzeigen zu können.

Von den fünf berücksichtigten Gebäudetypen wurden vier als Neubau und vier als Sanierungsfall aufbereitet. Zudem wurde mit Bezug zur Ausprägung der Gebäudehülle zu diesen insgesamt acht Fallbeispielen dann der Fensteranteil („Normalfassade“ mit ca. 20-30 Prozent sowie „Lochfassade“ mit ca. 15 Prozent) variiert. Mit diesen gebäudebezogenen Ausgangsdaten konnte somit, basierend auf insgesamt 16 in den Bauteilaufbauten der wärmeumfassenden Hülle unterschiedlich ausgeprägten Gebäudevarianten, die Auslegung der Windheizung 2.0-Konzepte in der Studie untersucht werden. Die zugrunde gelegten Varianten decken dabei einen Großteil der für eine Umsetzung der Windheizung 2.0 geeignet erscheinenden Bauweisen ab. Im Anhang A.5 sind alle berücksichtigten Gebäudeparameter zu den Fallbeispielen aufbereitet. Diese Parameter bildeten auch die im Vorfeld der Anwendung des Windheizung 2.0-Planungstools im Rahmen der Parameterstudie im GEG-Tool eingegebenen Randdaten zur Erstellung einer normierten Dokumentation der Energiebilanz (DIN TS 18599 Beiblatt 3) bzw. dem entsprechenden XML-Datenmodell als Eingangsdatensatz. Für alle Gebäude wird im GEG-Tool eine fest definierte „fiktive“ Anlagentechnik (vgl. Kapitel 4.2.1) angesetzt. Diese stellt eine einheitliche Ausgangsparametrierung der Eingangsdaten in das Windheizung 2.0-Tool sicher (Endenergiebedarf). Hierbei sind allen in das Planungstool eingehenden Gebäudedaten jeweils eine dezentrale Stromheizung und Warmwasserbereitung im GEG-Tool modelliert. Darüber hinaus sind Aufbauten der Hüllbauteile, sowohl für die Neu- als auch für die Sanierungsfälle, im GEG-Tool an das für die Eignung als Windheizung 2.0 Gebäude angesetzte Kriterium von maximal 50 Prozent des Endenergiebedarfs vom Referenzgebäude angepasst. Dabei wurde, unter Beibehaltung der typischen Konstruktionsmaterialien, insbesondere die Dämmung entsprechend ausgelegt.

Randbedingungen der Auslegungsgrößen

Im Planungstool wurden zu den Fallbeispielen jeweils die drei Windheizung 2.0-Technologien als Wärmespeicher mit verschiedenen Ausprägungen ausgelegt und die entsprechende Eignung dieser Konfigurationen untersucht. Zur Definition der „normalen“ (100 Prozent) Speicherkapazität von HTSS sowie WWS wurde der Windheizung 2.0-Speicher so ausgelegt, dass eine Windstromdeckung 90 Prozent (bzw. im Sanierungsfall: 85 Prozent) erreicht wird. Diese Auslegung wird für jeden Gebäudetyp (ggf. getrennt nach Neubau/Sanierung) einmal durchgeführt. Veränderungen der Fensterflächen oder eine Verbesserung der energetischen Gebäudequalität wird mit identischen Speichergrößen betrachtet. Eine weitere Variante mit um 20 Prozent erhöhter Speicherkapazität (120 Prozent) wurde ebenfalls betrachtet. Bei den BTA-Speichern ergibt sich die

Speicherkapazität aus der Fläche der aktivierbaren Bauteile. In Tabelle 28 sind die resultierenden Speicherkapazitäten für den Neubau des Hauses Leitershofen dargestellt. Zur besseren Einordnung dieser Kapazitäten sind sowohl die entsprechenden, äquivalenten WWS-Größen angegeben als auch die Kosten, wenn ein Speicher dieser Kapazität als Batteriespeicher ausgeführt werden würde. Die Batteriespeicherkosten werden hierfür mit 800 €/kWh Speicherkapazität angesetzt [38]. Hier wird v.a. deutlich, wie günstig thermische im Vergleich zu elektrischen Speichern sind und welches Gebäudevolumen bei der Nutzung der beiden im Projekt entwickelten Speichersysteme (HTSS, überdämmte BTA) gegenüber einer Wärmespeicherung mit einem großvolumigen Wasserbasierten Wärmespeicher eingespart werden kann.

Gemäß der detaillierten Eingabemöglichkeit der BTA im Planungstool wurden sowohl die aktivierten Bauteiltypen Decke bzw. Wand als auch deren spezifisches Material bzw. die für die Speicherfähigkeit ausschlaggebende Bauteildicke betrachtet. Zu beachten ist bei den ausgewerteten Ergebnissen der Studie, dass jeweils bei den sanierten Gebäudevarianten ein unbeheizter Keller (gedämmte Kellerdecke) im Gegensatz zu einem beheizten Keller in den Neubauvarianten angesetzt wurde. Dies verhindert zwar durch unterschiedliche BTA-Flächen und Gebäudevolumen eine direkte Vergleichbarkeit der BTA in Neubau- bzw. Sanierungsvariante, entspricht jedoch der Praxis, in der ein Keller nicht zwingend aufgrund der aufwendigen Dämmung in einer Sanierung auf Passivhausniveau ausgebaut wird.

Tabelle 28:
Speicherkapazitäten der Toolstudie mit vergleichenden WWS-Volumen und Batteriespeicherkosten.

| Gebäude: Leitershofen Neubau | Windheizung 2.0 - Speichersystem | | | | |
|--|----------------------------------|-------------|-------------------|-----------|-----------------------------------|
| | HTSS | WWS | BTA Decke + Wände | BTA Decke | <i>BTA Decke Sanierungslösung</i> |
| Auslegungskapazität (100 %) [kWh] | 2.056 | 2.058 | 836 | 545 | 605 |
| Windheizung 2.0-Speicherkosten [€] | 47.793 € | 29.400 € | 137.091 € | 38.366 € | 58.955 € |
| Spezifische Windheizung 2.0 Speicherkosten [€/kWh] | 23 € | 14 € | 164 € | 70 € | 97 € |
| Äquivalentes WWS- / Wasserspeichervolumen [l] | 29.371 | 29.400 | 11.943 | 7.781 | 8.645 |
| Äquivalente Lithium-Batteriespeicherkosten [€] | 1.644.800 € | 1.646.400 € | 668.784 € | 435.708 € | 484.120 € |

Größen der Bewertung

Ergänzend zur energetischen Auslegung der Windheizung 2.0 ermöglicht das Tool die Auswertung vor dem Hintergrund von Wirtschaftlichkeit und Umweltwirkung (Lebenszyklusbetrachtung – LCA). Mit der aktuellen Situation einer hochdynamischen Preisentwicklung im Bauwesen, wurde eine kostentechnische Evaluation zugunsten durch die Anwendenden eigenständig einbaubaren Kostenkennwerten im Werkzeug umgesetzt. Auf Seiten der LCA wurde die Evaluation der ausgegebenen Umweltwirkungen zu ausgelegten Windheizung 2.0-Gebäuden mittels stichprobenartig per vergleichender Handrechnung validierter

Fallbeispiele bewerkstelligt (vgl. Kapitel 3.2). Hierbei konnte durch das Feinjustieren der im Werkzeug hinterlegten Faktoren die Ergebnisbewertung letztendlich optimiert werden.

Eine entscheidende, derzeit jedoch noch schwer einzuschätzende Randbedingung der Parameterstudie stellt der Strombezugspreis für sog. Überschussstrom ("Kosten Überschussstrom kWh") dar. Gemäß Abschnitt 5.7 wird der Grenzwert des EPEX SPOT Day-ahead Börsenhandels für einen marktdienlichen Betrieb der Windheizung 2.0 auf 0 ct/kWh gesetzt. Um Zeiträume größer als 1-2 Wochen ohne marktdienlichen Strombezug zu vermeiden, wird dieser Grenzwert auf 3 ct/kWh erhöht und das Kriterium der Netzdienlichkeit auf die ausschließliche Adressierung von gelben und roten Ampelphasen im Bereich der Überspannung (Netzauslastung) verschärft. Darauf basierend und unter der Annahme einer Weitergabe des Day-Ahead Börsenstrompreises an den Betreiber des Windheizung 2.0-Gebäudes wird der Strompreisanteil für Beschaffung/Vertrieb konservativ mit 1,5 ct/kWh angenommen. Unter Anwendung der Vorschläge für eine Flexibilisierung der verbliebenen Strompreisbestandteile gemäß Bild 205 resultiert ein Bezugspreis für Überschussstrom von 8,83 ct/kWh.

6.4.2 Gesamtauswertung Studienergebnisse

Im Folgenden werden anhand der für das Normalwindsignal ausgelegten sechs Windheizung 2.0 Speichertypen und –Größen

(BTA Decke und Wand, BTA Decke, HTSS 100 Prozent, HTSS 120 Prozent, WWS 100 Prozent, WWS 120 Prozent)

in den acht Gebäudetypen

(Haus Leitershofen Neubau bzw. Sanierung, Zwillingshaus Neubau bzw. Sanierung, IWU Reihenhaustyp RH J Neubau bzw. Sanierung, IWU Haustyp EFH G Neubau und IWU Haustyp EFH J Sanierung)

die Auswertungen im Planungswerkzeug dargestellt. Das erste Diagramm in Bild 239 stellt die Überschussstromdeckung am gesamten, spezifischen Endenergiebedarf dar. Im zweiten Diagramm werden die Endenergiebedarfswerte pro Quadratmeter Energiebezugsfläche gegenübergestellt. Dabei gibt der Rahmen der Balken im Diagramm den Gesamtendenergiebedarf inklusive des EE-Faktors (siehe Abschnitt 4.2.5) an. Die beiden Diagramme darunter zeigen die spezifische ökologische und ökonomische Auswertung der einzelnen Varianten. Hierzu wird das Delta der potenziellen Umweltwirkungen des Windheizung 2.0-Konzeptes bezüglich der Betriebsphase und des konstruktiven Mehraufwands für die Gebäudeeffizienz im Rahmen der Herstellung zum GEG-Referenzgebäude dargestellt. Dabei ist zur Berechnung des potenziellen Beitrags zur Globalen Klimaerwärmung (Treibhauspotenzial, GWP), die Entwicklung des Strom-Mix DE gemäß dem BMWi-Basiszenario angesetzt. Das unterste Diagramm zeigt mit dem Delta Kapitalwert zum GEG Referenzgebäude über 25 Jahre den ökonomischen Mehrwert der Investition in die Windheizung. Hierbei wurden die standardmäßig im Planungswerkzeug hinterlegten Randbedingungen für die ökonomische Bewertung verwendet (25 Jahre Betrachtungszeitraum, 2 Prozent Steigerung der jährlichen Energiekosten, keine Kostensteigerung für Überschussstrom).

Man kann erkennen, dass mit den gewählten Windheizung 2.0-Konzepten Überschussstromdeckungsgrade zwischen 80 Prozent - 100 Prozent erreicht werden. Beim HTSS und WWS ergibt sich dieser Bereich aus der vorangegangenen Dimensionierung der Speicher. Es fällt auf, dass trotz der deutlichen Vergrößerung der nominellen Kapazität des BTA-Speichers bei Hinzunahme der Wände kaum eine Erhöhung der Überschussstromdeckung resultiert. Ebenso wird deutlich, dass alle Windheizung 2.0-Varianten, im Vergleich zur GEG-Referenz potenzielle Emissionen einsparen können (etwa 12 bis 27 kg CO₂-Äquiv. je m² und a). Die Wirtschaftlichkeit ist ebenfalls für alle Varianten außer dem BTA-Speicher mit aktivierten Wänden und Decken gegeben. Über den 25-jährigen Betrachtungszeitraum kann ein Kostenvorteil von 100 – 500 €/m² erreicht werden. Dieser Kostenvorteil fällt im Vergleich mit der Vorgängerstudie ausgeprägter aus. Dies ist vor allem an der Preisentwicklung zwischen der ersten Studie im Jahr 2015 und dem Betrachtungszeitraum Ende 2021 begründet. In diesen sechs Jahren hatten sich die Stromkosten kaum erhöht, die Baukosten sind um ca. 50 Prozent gestiegen und die Gaspreise haben sich fast verdreifacht. Somit bekommt die Betriebsphase der GEG-Referenz ein stärkeres Gewicht zu Gunsten der Windheizung 2.0 als früher. Trotz dieses günstigen Einflusses sind BTA-Varianten mit Decken und Wänden in den meisten Fällen nicht wirtschaftlich.

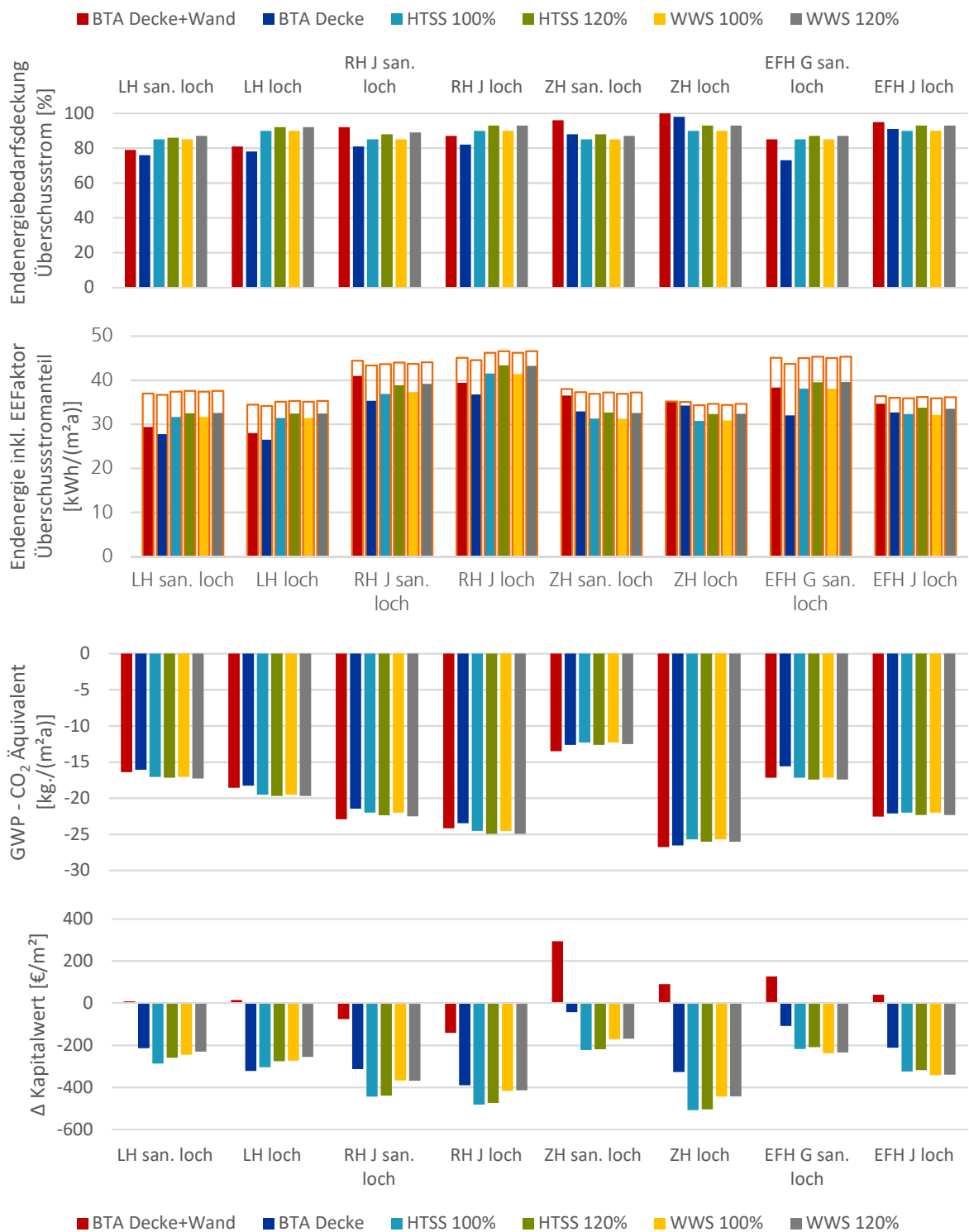


Bild 234:
 Ergebnisdarstellung der sechs betrachteten Windheizung 2.0-Speichertypen und –Größen für die acht betrachteten Gebäude bezüglich der Überschussstromdeckung, der Endenergie, des Treibhaupotentials und der Ökonomie.

6.4.3 Einfluss Überschussstrompreis auf den Kapitalwert

Zur Verdeutlichung der im Planungswerkzeug hinterlegten Parameter zu den Überschussstromkosten bei der Berechnung des Kapitalwertes wurden verschiedene Preisniveaus ausgewertet und gegenübergestellt. Der Betrachtung möglicher Strompreisentwicklungen wurden dabei die in Bild 235 dargestellten Überschussstrompreise zugrunde gelegt. Das folgende Diagramm stellt für diese Strompreise am Beispiel der Leitershofener Neubauvariante aus den Fallbeispielen der Studie jeweils das Kapitalwertdelta zum Referenzgebäude für die einzelnen Windheizung 2.0-Varianten (Betrachtungshorizont von 25 Jahren) dar. Dabei ist zu beachten, dass entgegen der Preissteigerung für die konventionellen Energien (und Gas) von 2 Prozent bei der Berechnung des Kapitalwertes für den Überschussstrom keine Kostensteigerung im Betrachtungszeitraum angesetzt wurde [1] („Da durch den fortschreitenden Windkraftausbau mit der Zeit auch der Anteil an verfügbarem Überschussstrom ansteigt, erscheint diese Annahme gerechtfertigt“). In Bild 235 kann man erkennen, dass außer der Wand-Decken-BTA alle Windheizung 2.0-Varianten einen günstigeren Kapitalwert aufweisen als die GEG-Referenz. Wie in Abschnitt 6.4.2 beschrieben, ist Ende 2021 der Gaspreis stark gestiegen, der Strompreis nicht (Zum Fertigstellungszeitpunkt dieses Berichts schon wieder überholt). Wegen dieses reduzierten Kostenunterschieds zwischen den Energieträgern bleibt ein Windheizung 2.0-Gebäude, auf Grund seines geringeren Energiebedarfs, auch bei steigenden Energiekosten wirtschaftlich.

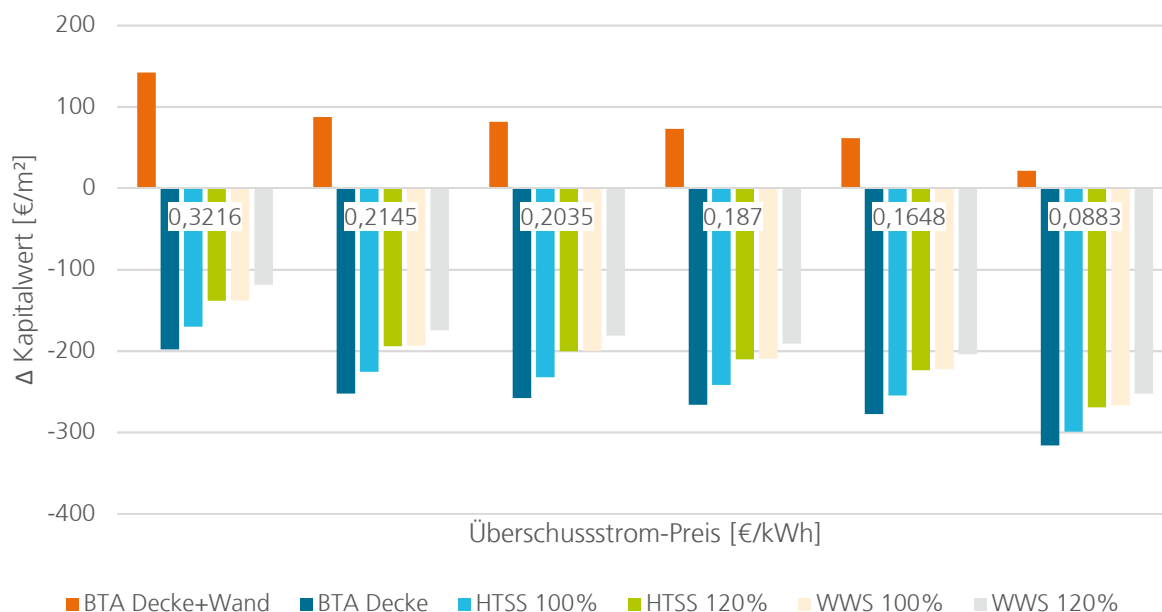


Bild 235:
Einfluss des Überschussstrompreises auf das Delta des Kapitalwertes des Gebäudes Leitershofen (Neubau).

6.4.4 Detailbetrachtung Windprofile

Zur besseren Einordnung der in der Studie angesetzten Überschussstromprofile wurden verschiedene Windheizung 2.0-Varianten mit den beiden unterschiedlichen Profilen nach Abschnitt 5.7 ausgewertet. Hierzu wurde das Haus Leitershofen sowohl mit dem reellen Fensterflächenanteil als auch mit einer reduzierten Lochfassade („LH loch“) mit beiden Profilen berechnet. In Bild 236 sind hierzu in Abhängigkeit der einzelnen Windheizung 2.0-Komponenten die entsprechenden Überschussstromdeckungen des Energiebedarfs dargestellt. Hierbei zeigt sich, dass ein Schaltsignal mit deutlich geringerer Ladepulsdichte in allen Varianten die Überschussstromdeckung um ca. 15 Prozent, auf inakzeptabel geringe Werte reduziert. Bei den Varianten mit HTSS und WWS kann die Speicherkapazität angepasst werden, um die angestrebten Windstromdeckungen zu erreichen, allerdings mit einer einhergehenden Verschlechterung bezüglich Ökologie und Ökonomie. Zudem kann man erkennen, dass eine Reduktion der Fensterflächen, durch den verbesserten HT'- bzw. niedrigeren mittleren U-Wert der Gebäudehülle, nur zu einer sehr geringen Steigerung der Überschussstromdeckung führt.

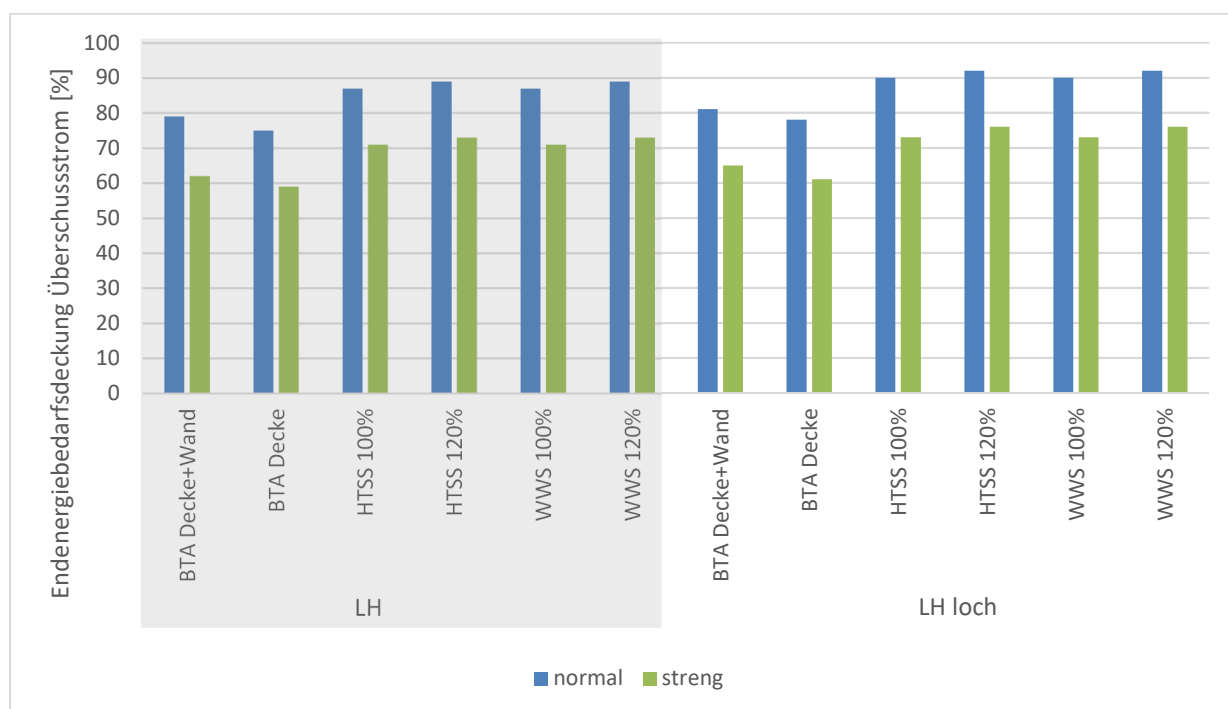


Bild 236: Vergleich der Überschussstromdeckung des sanierten Haus Leitershofen mit Loch- und mit Normalfassade für die unterschiedlichen Speicherarten und Überschussstromsignale.

Wie schon in der obigen Gegenüberstellung zu den Überschussstromprofilen zeigt sich auch im folgenden Bild 237, in der das sanierte und das neue Reihenhause gegenübergestellt sind, ein ähnliches Verhalten zwischen den beiden Schaltprofilen. Auch hier reduziert ein Schaltsignal mit deutlich geringerer Ladepulsdichte in allen Varianten die Überschussstromdeckung um ca. 15 Prozent. Zwischen den beiden gegenübergestellten Gebäudevarianten zeigen sich jedoch keine signifikant unterschiedlichen Auswirkungen der unterschiedlichen Profile.

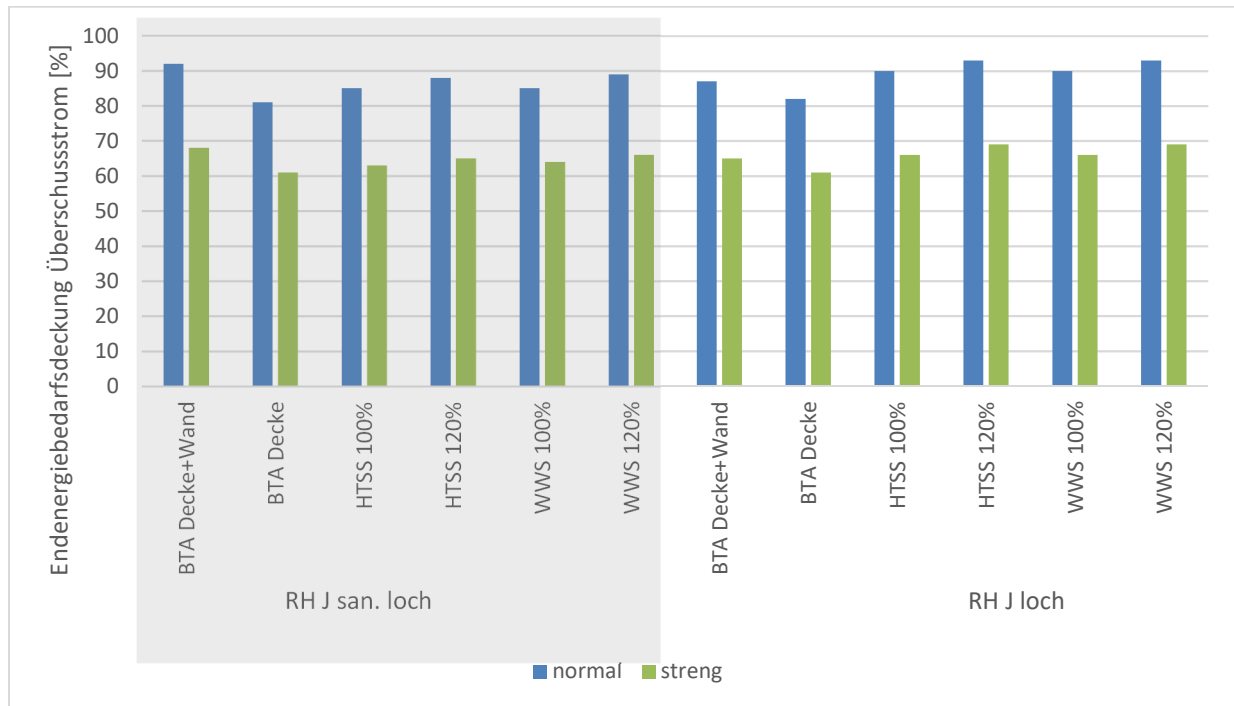


Bild 237: Vergleich der Überschussstromdeckung des sanierten und des neuen Reihenhauses mit Lochfassade für die unterschiedlichen Speicherarten und Überschussstromsignale.

6.4.5 Gegenüberstellung des Windheizung 2.0-Kriteriums zu verbesserter thermischer Hülle

In diesem Abschnitt wird am Beispiel des Hauses Leitershofen das Windheizung 2.0-Kriterium (vgl. Kapitel 6.4.1) untersucht, wie sich eine Hülle, die dem „Passivhausstandard“ entspricht, verglichen mit der nicht ganz so effizienten Windheizung 2.0-Mindesthülle nach GEG verhält. Grundlage dieser Variante bildeten Bauteilaufbauten, unter denen das Gebäude dem Passivhaus-Kriterium (Heizwärme 15 kWh/(m²a)) entspricht. Damit diese deutlich verbesserten Hüllbauteilen jedoch mit dem Planungswerkzeug ausgelegt werden konnten, wurde im GEG-Tool nur die Gebäudehülle berücksichtigt und mit der gleichen „fiktiven“ Anlagentechnik modelliert. Die Größe bzw. Speicherkapazität des HTSS und des WWS wird, verglichen mit der Hauptstudie in Abschnitt 6.4.1 bzw. 6.4.2, nicht angepasst, so dass die Überschussstromdeckungen 90 Prozent übersteigen können. In Bild 238 ist die Passivhausvariante (auf der linken Seite) jeweils der Windheizung 2.0-Mindestvariante (rechts) gegenübergestellt. Hier zeigt sich eine um 5 – 9 Prozent erhöhte Überschussstromdeckung auf Grund der verbesserten thermischen Hüllfläche bzw. aufgrund des verringerten Endenergiebedarfs. Dies wirkt sich auch positiv auf die im dritten (untersten) Diagramm dargestellten Deltas zum Kapitalwert des Referenzgebäudes aus.

Tabelle 29:
Vergleich der Bauteil-U-Werte.

| Bauteil | U-Werte der Bauteile [W/(m ² K)] | |
|---------------------------|--|------------|
| | Anforderung für ein Gebäude mit Windheizung 2.0 im Planungstool (50 % der GEG-Anforderungen) | Passivhaus |
| Außenwand | 0,17 | 0,11 |
| Dachfläche | 0,08 | 0,08 |
| Außentür | 0,79 | 0,78 |
| Kellerwand gegen Erdreich | 0,19 | 0,12 |
| Fenster | 0,80 | 0,80 |
| Bodenplatte | 0,23 | 0,14 |

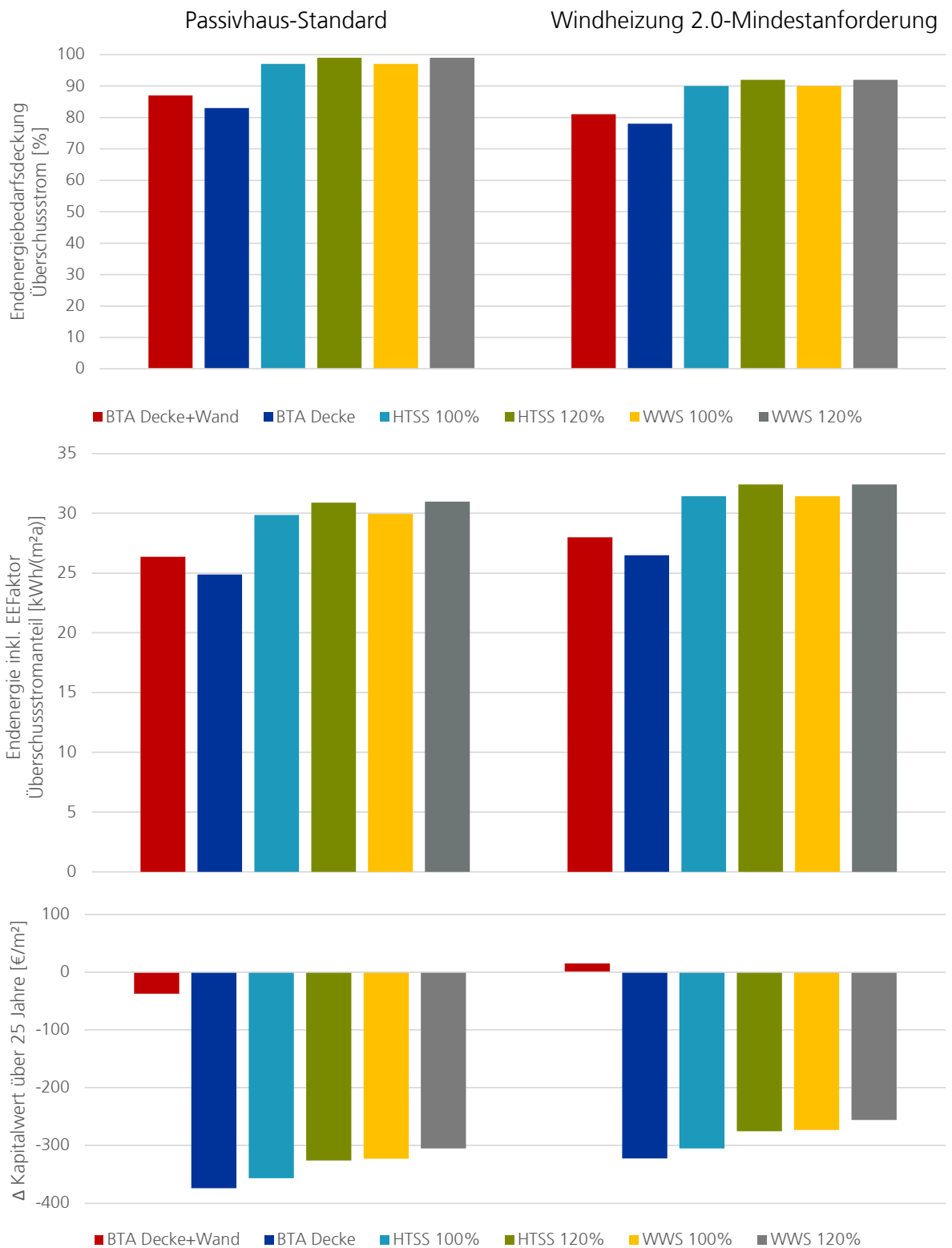


Bild 238: Vergleichsdiagramme der Windheizungsvarianten im Neubau Haus Leitershofen: Passivhaushülle (linke Balkengruppe) zu einem Gebäude gemäß Windheizung 2.0-Kriterium im Planungstool (rechte Balkengruppe).

6.4.6 Raumklimaqualität

Für die Bewertung der Raumklimaqualität werden die gewonnenen Ergebnisse der Stützsimulationen des Windperiodenverfahrens, Abschnitt 4.2, herangezogen. Die Gebäudesimulation mit Einbindung des Speichersystems ermöglicht die Berechnung des zeitlichen Verlaufs des Innenraumklimas, auch unter Einfluss von beispielsweise der passiven Entladung der Langzeitspeicher. Die Räume der untersuchten Gebäude wurden als vier, bzw. sechs Zonen abgebildet, Erdgeschoss, Schlafzimmer, Badezimmer und Dachgeschoss im Zwillingshaus und im Haus Leitershofen ergänzend Keller und Obergeschoss. Je Zone wird u.a. die Lufttemperatur, die Luftfeuchtigkeit und die mittlere Oberflächentemperatur aller angrenzenden Innenoberflächen ermittelt.

Betrachtet wird der „Predicted Mean Vote“ PMV, der neben Luft- und mittlerer Oberflächentemperatur, relative Luftfeuchtigkeit auch die Luftgeschwindigkeit (Luftzug) sowie körperliche Tätigkeit und Bekleidung anwesender Menschen berücksichtigt. Der PMV ist ein Index, der den Durchschnittswert für die Klimabeurteilung durch eine große Personengruppe vorhersagt. Für ein normales Maß an Erwartungen, mit dem üblicherweise im Neubau geplant wird, soll der PMV-Index zwischen -0,5 (zu kühl) und +0,5 (zu warm) liegen. Dieser Bereich wird hier als thermisch Behaglich angenommen. Zur Bewertung der Raumklimaqualität wird hier untersucht, welcher Anteil der Zeit der PMV-Index außerhalb des genannten Bereichs lag, wobei 5 Prozent der Zeit Überschreitungen noch akzeptabel sind. Es wird die längste Zeit je Zone ermittelt, in der der PMV-Index außerhalb des Bereichs des normalen Maßes lag. Für die Bewertung wird der längste Zeitraum in der Heizperiode (1. Oktober bis 1. Mai) je Zone betrachtet, in dem der PMV-Index außerhalb des normalen Maßes lag.

Es wurde konstant ein Aktivitätsniveau von 1,2 met (leichte (Haus-)Arbeit), eine relative Luftgeschwindigkeit von 0,1 m/s und ein Bekleidungsfaktor von 0,95 m²K/W (übliche Winterbekleidung im Innenraum) angesetzt. Des Weiteren wird angenommen, dass wenn es den Bewohner zu warm wird, die Jacke oder der Pullover abgelegt wird, um die thermische Behaglichkeit wiederherzustellen. In diesem Fall wird der PMV-Index im Winter, wenn er über 0,5 steigt, erneut berechnet – jedoch mit einem Bekleidungsfaktor von 0,57 m²K/W.

Mit den genannten Annahmen ergeben alle betrachteten Fälle mit WWS und mit HTSS ein normales Maß an Erwartungen. Hier liegt der PMV-Index fast ausschließlich zwischen -0,5 und +0,5. Im Zwillingshaus mit Innenwand-BTA im Sanierungsfall (Bild 239) und im Haus Leitershofen, in den Neubau und Sanierungs-Fällen mit Decken-BTA (Bild 240) wurde eine Zeit über 5 Prozent in der Heizperiode ermittelt, in der der PMV-Index über 0,5 lag. In allen weiteren Simulationen mit BTA-Speichersystem ist die Zeit außerhalb des PMV Zielkorridors gleich oder annähernd Null.

Im Fall mit sanierten Zwillingshaus und Innenwand-BTA ist auffällig, dass lediglich im Badezimmer der PMV-Index außerhalb des Soll-Korridors liegt (vgl. Operativtemperatur in Bild 241) und die 5 Prozent-Grenze, mit 8,5 Prozent der

Heizperiode übersteigt. In den anderen Zonen ist es thermisch behaglich. Kommt die Decken-BTA noch dazu, ist es im Badezimmer deutlich länger (23 Prozent der Heizperiode) und des Weiteren in der zusammengefassten Erdgeschosszone 11,5 Prozent der Heizperiode zu warm. Im Haus Leitershofen haben die Fälle, in denen es zu warm wird (Neubau- und Sanierungs-BTA, mit 50 kW Anschlussleistung) parallel eine sehr hohe Überschussstromdeckung von 90 Prozent, bzw. 84 Prozent, jedoch wird es in allen Zonen zu warm, wie den Temperaturverläufen in Bild 242 entnommen werden kann.

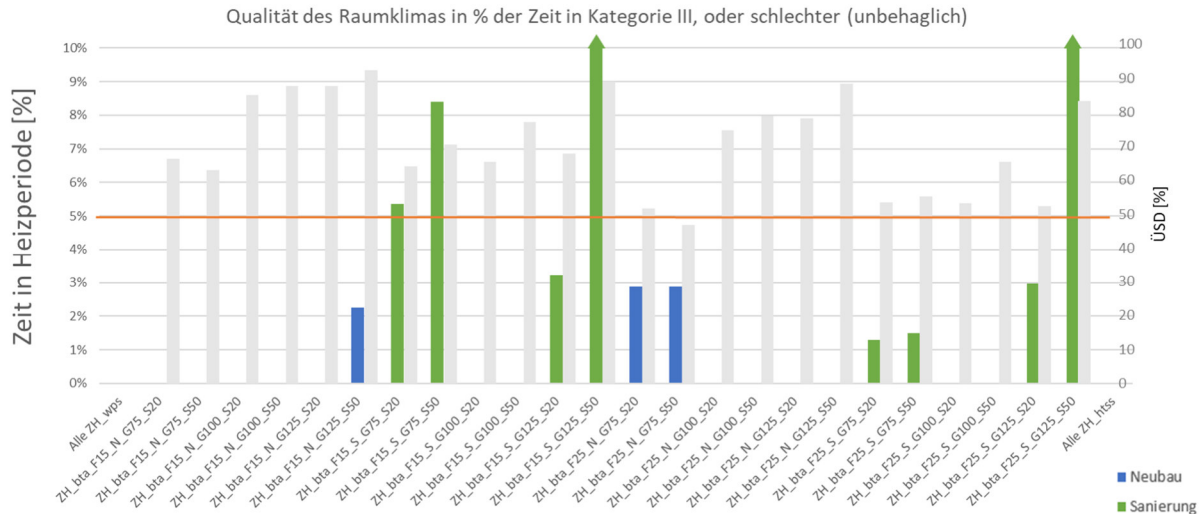


Bild 239: Zusammengefasste Simulationsergebnisse der Stützsimulationen im **Zwillingshaus**: Qualität des Raumklimas in Prozent der Zeit außerhalb des normalen Maßes an Erwartungen (thermisch unbehaglich), bewertet an Hand des Predicted Mean Vote (PMV), in der wärmsten Zone. Bezeichnungen nach Tabelle 21. Zur Wertung ist in Grau die jeweilig ermittelte Überschussstromdeckung von 0 bis 100 Prozent ergänzt.

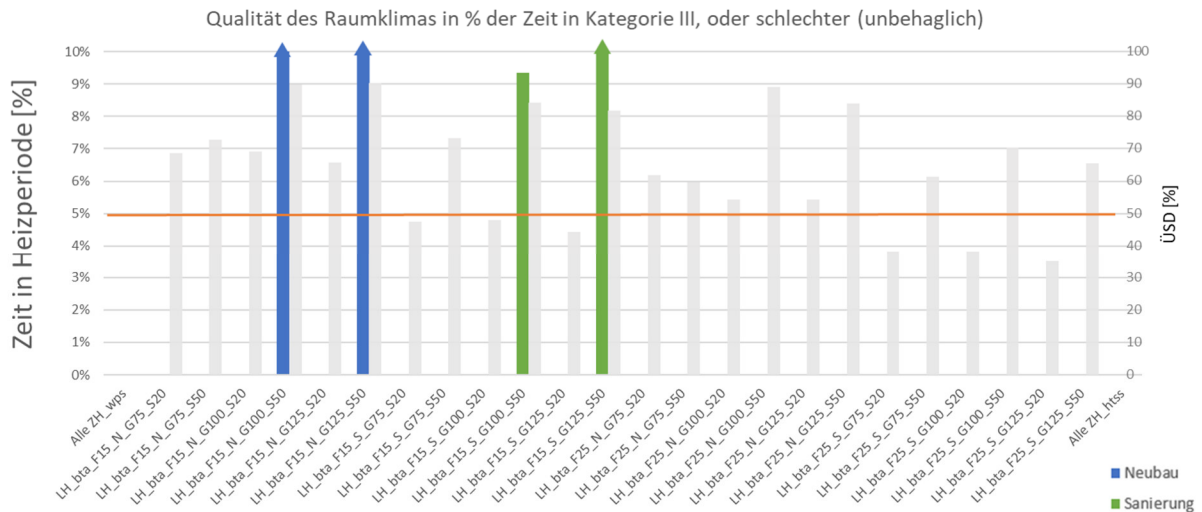


Bild 240:
 Zusammengefasste Simulationsergebnisse der Stützsimulationen im Haus **Leitershofen**: Qualität des Raumklimas in Prozent der Zeit außerhalb des normalen Maßes an Erwartungen (thermisch unbehaglich), bewertet an Hand des Predicted Mean Vote (PMV), in der wärmsten Zone. Bezeichnungen nach Tabelle 21. Zur Wertung ist in Grau die jeweilig ermittelte Überschussstromdeckung von 0 bis 100 Prozent ergänzt.

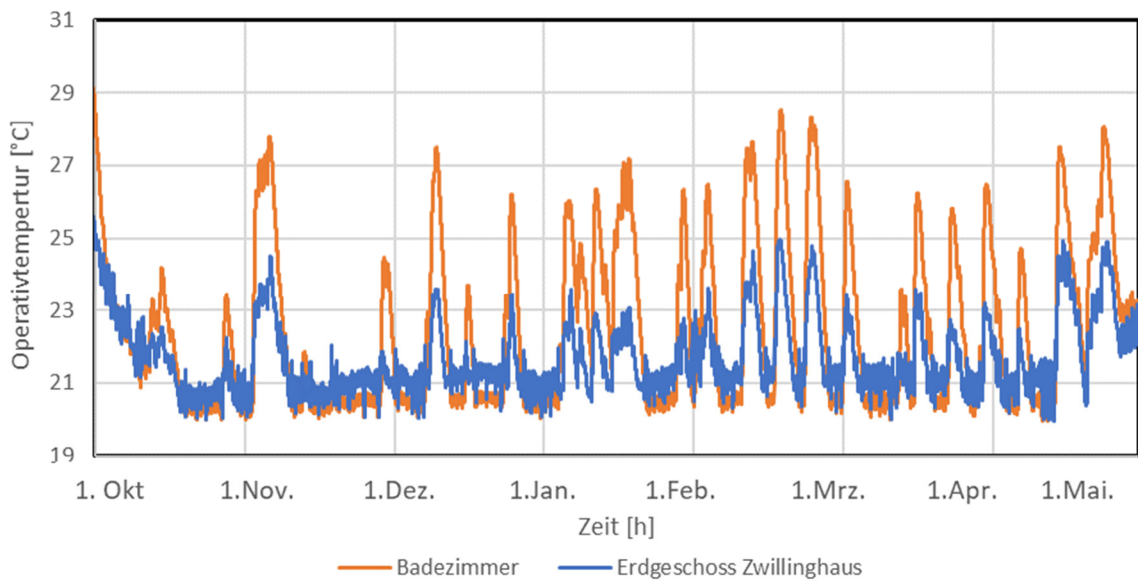


Bild 241:
 Verlauf Operativtemperatur im Fall (ZH_bta_F15_S_G75_S50) **saniertem Zwillingshaus** und Innenwand-BTA und 50 kW Anschlussleistung.

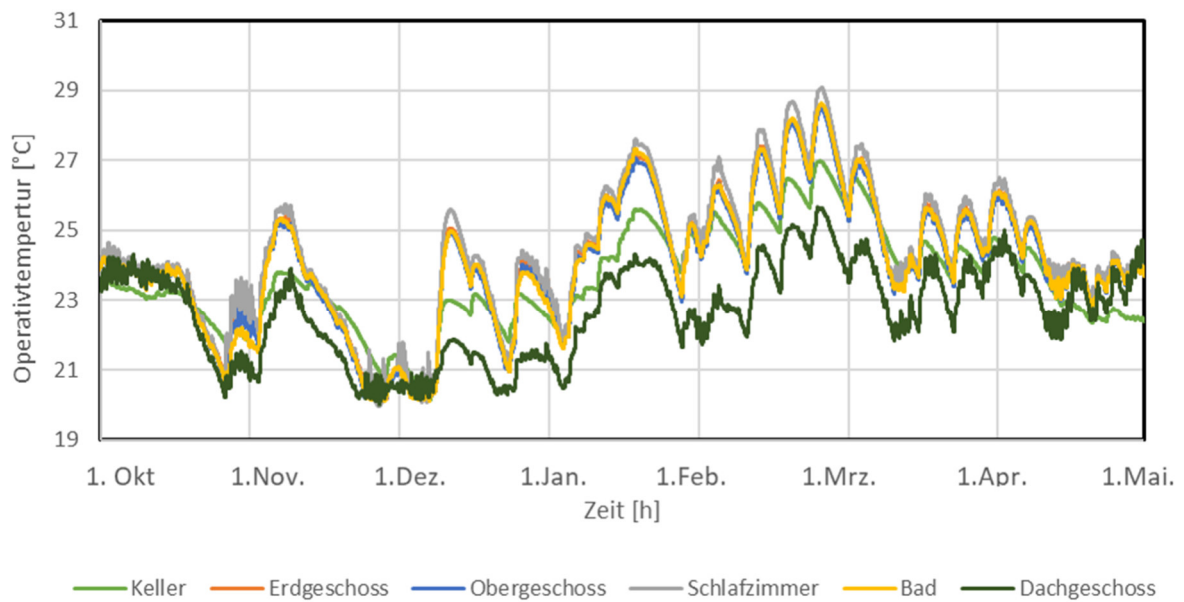


Bild 242:
Verlauf Operativtemperatur im Fall (LH_bta_F15_N_G100_S50)
Leitershofen Neubau mit Deckenwand-BTA und 50 kW Anschlussleistung.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Ziel der Forschungsarbeiten war die Entwicklung und Feldtest-Erprobung der neuen Speichertypen (Hochtemperatur-Steinspeicher (HTSS) und raumseitig überdämmte BTA-Speicher) für das Konzept Windheizung 2.0. Parallel wurde für die Windheizung 2.0-Speicher ein prädiktives Regelungssystem erarbeitet und in den Versuchen erprobt. Außerdem wurde ein Auslegungsverfahren für Windheizung 2.0-Gebäude entwickelt und dieses in ein entsprechendes Auslegungstool integriert. Unter Verwendung dieses Tools ist ein versierter Endanwender wie z.B. ein Energieberater oder Fachplaner im Rahmen einer energetischen Auslegung in der Lage festzustellen, ob bzw. mit welchen Anpassungen ein Gebäude Windheizung 2.0 geeignet ist und welche Speichergößen zur Deckung des Heizwärme- und Trinkwarmwasserbedarfs erforderlich sind.

Die im Rahmen dieses Vorhabens entwickelte prädiktive Regelung lernt auf Basis von Temperatur- und Verbrauchswerten selbstständig die Charakteristik des Gebäudes und nutzt eine Wettervorhersage, um den Wärmebedarf des Windheizung 2.0-Gebäudes für die kommenden 7,5 Tage vorherzusagen (maximaler Wetterprognosezeitraum). Die Beladung des Speichers wird so von der Regelung automatisch an diese Bedarfsprognose angepasst. Hierdurch wird sichergestellt, dass die Speicher immer nur so weit beladen werden, wie zur Deckung des Wärmebedarfs in der folgenden Woche nötig ist. Dies ist insbesondere bei den Speichervarianten HTSS und BTA wichtig, da deren passive Wärmeabgabe

(BTA) bzw. Wärmeverluste (HTSS) ansonsten zu einer Überwärmung des Gebäudes führen würde. Die Regelung gewährleistet somit, dass auch in weniger kalten Perioden die Wärmeverluste der Speicher maximal im Bereich des Wärmebedarfs des Gebäudes bleiben und damit nicht verloren, sondern nutzbar sind. In den Perioden, in denen die Speicher wie gewünscht beladen wurden, konnten die Raumlufttemperaturen meist in dem gewünschten Temperaturkorridor von max. 3 K oberhalb der Soll-(Minimal-)Temperatur eingehalten werden. Die Messungen zeigten, dass die aktivierten Bauteile nicht zu stark erwärmt werden dürfen, damit die vom Nutzer gewünschte Raumlufttemperatur nicht überschritten wird. In Zeiten mit noch nicht optimaler Regelung kam es teilweise zu höheren Überwärmungen.

Die drei neuen Speichertypen (der BTA-Speicher für den Sanierungsfall, der BTA-Speicher für den Neubau und der HTSS) wurden konzipiert, ausgelegt und in realen Gebäuden auf dem Freiland-Versuchsgelände des Fraunhofer IBP installiert. Abgesehen von einem Luftführungsproblem am HTSS haben alle drei Speicher den Erwartungen entsprechend funktioniert. Basierend auf den verfügbaren Profilen potentieller Ladezeiten mit Überschussstrom- (Windstrom-) Verfügbarkeit konnten an den bestehenden Versuchsgebäuden Überschussstromdeckungen von 77 Prozent bis über 90 Prozent nachgewiesen werden. Bei längeren Abständen zwischen den Überschussstrom-Ladepulsen konnten Überbrückungsdauern ohne Wärmebezug von 10 Tagen nachgewiesen werden (7 Tage bei der Sanierungs-BTA). An dieser Stelle muss darauf hingewiesen werden, dass die verfügbaren Testgebäude nicht ganz den Anforderungen der Windheizung 2.0 an hocheffiziente Gebäude genügen. Es ist zu erwarten, dass bei identischer Speichergröße Gebäude, die den Windheizung 2.0-Mindestanforderungen entsprechen oder darüber hinausgehen, höhere Überschussstromdeckungen und längere Überbrückungszeiten erreichen. Welches der drei Speichersysteme für ein konkretes Gebäude geeignet ist, muss im Rahmen der individuellen Planung ermittelt werden. Der HTSS zeichnet sich durch niedrige Kosten und einen geringen Platzbedarf aus, allerdings muss zwingend eine zentrale Wohnungslüftung vorhanden sein. Da die Bauteilaktivierung ohnehin vorhandenen Gebäudemassen nutzt, ist wenig Aufstellfläche (ca. 1,5 m²) erforderlich. Bei einer Wand-BTA müssen wenige Zentimeter Raumverlust in Kauf genommen werden, bei der Deckenlösung muss genügend Raumhöhe verfügbar sein. Eine Decken-BTA bzw. Wärmeübergabe bietet im Sanierungsfall den Vorteil, dass weder Türblatthöhen noch Türzargen angepasst werden müssen, was bei Einbau einer nachträglichen Fußbodenheizung in der Regel der Fall ist. Der lediglich in den theoretischen Studien betrachtete großvolumige wasserbasierte Wärmespeicher (WWS) dürfte vor allem dort zum Einsatz kommen, wo bereits große Wasserspeicher vorhanden sind, wie z.B. bei der Ertüchtigung von Sonnenhäusern. Die Kosten des HTSS betragen 23 €/kWh, er hat ein typisches Volumen von 4-9 m³ (Einfamilienhaus) und kann mit einer mittleren Leistung von 40 kW Überschussstrom laden. Die Kosten für die Neubau-BTA betragen 141 €/m², für die Sanierungs-BTA 325 €/m². Die BTA-Systeme können mit einer mittleren Leistung von ca. 250 W/m² Überschussstrom laden. Die Kosten des WWS betragen 14 €/kWh, er hat ein typisches Volumen von 9 – 30 m³ (Einfamilienhaus). Die realisierbare Ladeleistung hängt von der Dimensionierung bzw.

dem maximalen Durchfluss des Durchlauferhitzers ab; typischerweise liegt diese bei 40 – 50 kW. Verglichen mit den Kosten eines Lithium-Batteriespeichers, ca. 800 €/kWh, sind die Windheizung 2.0-Speicherlösungen somit sehr günstig.

Die unter Verwendung des neuen Auslegungstools durchgeführte Parameterstudie zeigt für die betrachteten Typgebäude Überschussstromdeckungen zwischen 80 und 90 Prozent, teilweise bis zu 100 Prozent. Grundsätzlich bestätigte sich der Zusammenhang zwischen Gebäudeeffizienz und lange Überbrückungsdauer bzw. hohem Deckungsanteil aus Überschussstrom.

Alle basierend auf den Vorgängerstudien ausgewählten Speichervarianten zeigen mit einer CO₂-Reduktion von **7 – 16 kg/(m²a)** auf ihren Lebenszyklus bezogen einen ökologischen Vorteil gegenüber einem Gebäude nach GEG-Standard (Referenzszenario). Basierend auf den Bau- und Energiepreisen zum Betrachtungszeitraum Ende 2021 sind alle definierten Windheizung 2.0-Varianten wirtschaftlich darstellbar, mit Ausnahme solcher, bei denen Decken und Wände gleichzeitig aktiviert werden.

Im Rahmen des Forschungsprojektes wurden sinnvolle Kriterien für den mehrkriteriellen Betrieb der Technologie Windheizung 2.0 gemeinsam mit den beteiligten Netzbetreibern identifiziert. Ein Simulationsmodell für die Erstellung von netz- und marktdienlichen Betriebsempfehlungen, basierend auf historischen Wetterprognosedaten des Deutschen Wetterdienstes, Geoinformationen und Stromnetzinformationen des beteiligten Verteilnetzbetreibers LVN wurde entwickelt. Darüber hinaus wurden Vorschläge für die Flexibilisierung von Strompreisbestandteilen sowie Verfahren für die Prognose von a) transregionalen Stromeinspeisungen von Windenergie- und Photovoltaikanlagen sowie b) Börsenstrompreisen des Day-Ahead Handels der EPEX SPOT für die Deutsch-Luxemburgische Gebotszone vor Handelsschluss erarbeitet. Die Erprobung des Simulationsmodells wurde mit den Projektpartnern im Rahmen von Feldversuchen im Freiland ohne Nutzer von Dezember 2020 - Mai 2022 erfolgreich realisiert.

Das Windheizung 2.0-Konzept mit seiner Regelung, den BTA-Speichern, dem HTSS und dem WWS wird ab dem Jahr 2023 an vier bewohnten Gebäuden im Rahmen eines Demo-Vorhabens über zwei Messwinter weiter evaluiert. Dieses Vorhaben wird vom BMWK unter dem Förderkennzeichen 03EN6013(A) gefördert.

Insgesamt lassen sich viele Erkenntnisse des Projektes bezüglich flexibler, markt- und netzdienlicher Steuerung des Strombezuges auch auf andere potenziell flexible Stromverbraucher wie Wärmepumpen oder Elektrofahrzeuge übertragen. Der Ausbau von erneuerbaren Energien mit volatiler Erzeugung erfordert sowohl den Ausbau von Speichertechnologien als auch die Anpassung des Verbrauchs an die Erzeugung. Die Verbrauchsanpassung ist hier privat- und volkswirtschaftlich die günstigere Alternative und muss daher favorisiert werden.

dem maximalen Durchfluss des Durchlauferhitzers ab; typischerweise liegt diese bei 40 – 50 kW. Verglichen mit den Kosten eines Lithium-Batteriespeichers, ca. 800 €/kWh, sind die Windheizung 2.0-Speicherlösungen somit sehr günstig.

Die unter Verwendung des neuen Auslegungstools durchgeführte Parameterstudie zeigt für die betrachteten Typgebäude Überschussstromdeckungen zwischen 80 und 90 Prozent, teilweise bis zu 100 Prozent. Grundsätzlich bestätigte sich der Zusammenhang zwischen Gebäudeeffizienz und lange Überbrückungsdauer bzw. hohem Deckungsanteil aus Überschussstrom.

Alle basierend auf den Vorgängerstudien ausgewählten Speichervarianten zeigen mit einer CO₂-Reduktion von 12 – 26 kg/(m²a) auf ihren Lebenszyklus bezogen einen ökologischen Vorteil gegenüber einem Gebäude nach GEG-Standard (Referenzszenario). Basierend auf den Bau- und Energiepreisen zum Betrachtungszeitraum Ende 2021 sind alle definierten Windheizung 2.0-Varianten wirtschaftlich darstellbar, mit Ausnahme solcher, bei denen Decken und Wände gleichzeitig aktiviert werden.

Im Rahmen des Forschungsprojektes wurden sinnvolle Kriterien für den mehrkriteriellen Betrieb der Technologie Windheizung 2.0 gemeinsam mit den beteiligten Netzbetreibern identifiziert. Ein Simulationsmodell für die Erstellung von netz- und marktdienlichen Betriebsempfehlungen, basierend auf historischen Wetterprognosedaten des Deutschen Wetterdienstes, Geoinformationen und Stromnetzinformationen des beteiligten Verteilnetzbetreibers LVN wurde entwickelt. Darüber hinaus wurden Vorschläge für die Flexibilisierung von Strompreisbestandteilen sowie Verfahren für die Prognose von a) transregionalen Stromeinspeisungen von Windenergie- und Photovoltaikanlagen sowie b) Börsenstrompreisen des Day-Ahead Handels der EPEX SPOT für die Deutsch-Luxemburgische Gebotszone vor Handelsschluss erarbeitet. Die Erprobung des Simulationsmodells wurde mit den Projektpartnern im Rahmen von Feldversuchen im Freiland ohne Nutzer von Dezember 2020 - Mai 2022 erfolgreich realisiert.

Das Windheizung 2.0-Konzept mit seiner Regelung, den BTA-Speichern, dem HTSS und dem WWS wird ab dem Jahr 2023 an vier bewohnten Gebäuden im Rahmen eines Demo-Vorhabens über zwei Messwinter weiter evaluiert. Dieses Vorhaben wird vom BMWK unter dem Förderkennzeichen 03EN6013(A) gefördert.

Insgesamt lassen sich viele Erkenntnisse des Projektes bezüglich flexibler, markt- und netzdienlicher Steuerung des Strombezuges auch auf andere potenziell flexible Stromverbraucher wie Wärmepumpen oder Elektrofahrzeuge übertragen. Der Ausbau von erneuerbaren Energien mit volatiler Erzeugung erfordert sowohl den Ausbau von Speichertechnologien als auch die Anpassung des Verbrauchs an die Erzeugung. Die Verbrauchsanpassung ist hier privat- und volkswirtschaftlich die günstigere Alternative und muss daher favorisiert werden.

Generell hängt die Umsetzung der Windheizung 2.0 und aller anderen Flexibilisierungslösungen davon ab, dass politisch und energiewirtschaftlich die Rahmenbedingungen dafür geschaffen werden, dass eine möglichst große Anzahl von (Strom-) Verbrauchern, die sich flexibilisieren können, entsprechend ausgeprägt für ihr stromsystemdienliches Verhalten honoriert werden.

Das Windheizung 2.0-Planungstool kann unter

<https://ibpupdateservice.eneff06.de/ClickOnce/Windheizung/ToolWindheizung.application>

kostenfrei heruntergeladen werden.

8 Literaturverzeichnis

- [1] H. Sinnesbichler, M. Kersken, M. Pazold, K. Lenz, H. Erhorn, H. Erhorn-Kluttig, Schuhmacher Patrick, Doster Sarah, M. Jäger, F. Antretter und D. Schmidt, „Windheizung 2.0 - Energiespeicherung und Stromnetzregelung mit hocheffizienten Gebäuden“, Holzkirchen / Stuttgart, 2016.
- [2] M. Pazold, M. Kersken, J. Gantner, M. Jäger und H. Sinnesbichler, „Windheizung 2.0–Energiespeicherung und Stromnetzregelung mit hocheffizienten Gebäuden - Projektphase 2017“, IBP-Bericht Nr. EER - 016/2017/952, Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP, Holzkirchen, 2017.
- [3] M. Adam, P. Riegebauer und T. Spiegel, „Entwicklung von Steuerungssignalen zur systemdienlichen und ökologischen Stromabnahme“, HS Düsseldorf - ZIES, Düsseldorf, 2017.
- [4] A. Holm, J. Radon, H. Künzel und K. P. Sedlbauer, „Berechnung des hygrothermischen Verhaltens von Räumen“, *WTA Schriftenreihe*, pp. 81-94, 2004.
- [5] F. Antretter, M. Pazold, J. Radon und H. Künzel, „Kopplung von dynamischer Wärmebrückenberechnung mit hygrothermischer Gebäudesimulation“, *Bauphysik 35*, Nr. Heft 3, pp. 181-192, April 2013.
- [6] M. Eymard, T. Gallouët und R. Herbin, The Finite volume method. Handbook of numerical Analysis, Vol. VII, S. 713–1020, Amsterdam: North-Holland, 2000.
- [7] *DIN EN ISO 10211: Wärmebrücken im Hochbau – Wärmeströme und Oberflächentemperaturen – Detaillierte Berechnungen (EN ISO 10211:2007)*.
- [8] *Deutsche Mitarbeit im ECBCS-Annex RAP-RETRO : Teil A: Einfluss des Benutzerverhaltens auf das energetische und raumklimatische Verhalten von Gebäuden, Teil B Weiterentwicklung von WUFI Plus zur einfachen thermischen Gebäudesimulation für die Praxis, IB*.
- [9] ASHRAE, *Guideline 14-2014: Measurement of Energy, Demand, and Water Savings*, American National Standards Institute, 2014.
- [10] *DIN V 18599: Teil1-10:2018-09: Energetische Bewertung von Gebäuden - Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung*.
- [11] *DIN EN 13203-2:2015-08: Gasbeheizte Geräte für die sanitäre Warmwasserbereitung für den Hausgebrauch – Teil 2: Bewertung des Energieverbrauchs; Deutsche Fassung EN 13203-2:2015*.

- [12] *DIN EN ISO 14040: Umweltmanagement - Ökobilanz - Grundsätze und Rahmenbedingungen. Deutsche Fassung EN ISO 14040:2006+A1:2020. Beuth Verlag, Berlin, 2021.*
- [13] *DIN EN ISO 14044: Umweltmanagement - Ökobilanz - Anforderungen und Anleitungen. Deutsche Fassung EN ISO 14044:2006+A1:2018+A2:2020. Beuth Verlag, Berlin, 2021.*
- [14] *DIN EN 15804: Nachhaltigkeit von Bauwerken - Umweltproduktdeklarationen - Grundregeln für die Produktkategorie Bauprodukte. Deutsche Fassung EN 15804:2012+A1:2013. Beuth Verlag, Berlin, 2014.*
- [15] *DIN EN 15978: Nachhaltigkeit von Bauwerken - Bewertung der umweltbezogenen Qualität von Gebäuden - Berechnungsmethode. Deutsche Fassung EN15978:2011. Beuth Verlag, Berlin, 2012.*
- [16] *Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen e. V. (DGNB): DGNB System, Kriterienkatalog Gebäude Neubau, Version 2018. ENV1.1 - Ökobilanz des Gebäudes. Stuttgart, 2018.*
- [17] *VDI 2067: Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen. Grundlagen und Kostenberechnung. Deutsche Fassung VDI 2067 - Blatt 1. VDI-Verlag, Düsseldorf, 2012.*
- [18] *Sphera Solutions GmbH: GaBi 10. Software-System und Datenbank zur Ganzheitlichen Bilanzierung, Version 10.6.1.35 - 2020. Stuttgart, Leinfelden-Echterdingen, 2020.*
- [19] *Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (BMWSB): ÖKOBAUDAT, Version 2021-II vom 25.06.2021. Berlin, 2022. Online URL: <https://www.oekobaudat.de/>.*
- [20] *Loga, T. et al.: Deutsche Wohngebäudetypologie. Beispielhafte Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz von typischen Wohngebäuden. Zweite erweiterte Auflage. ISBN: 978-3-941140-47-9. Darmstadt, 2015.*
- [21] *DIN 276: Kosten im Bauwesen. Beuth Verlag, Berlin, 2018.*
- [22] *Deutscher Bundestag: Gesetz zur Einsparung von Energie und zur Nutzung erneuerbarer Energien zur Wärme- und Kälteerzeugung in Gebäuden (Gebäudeenergiegesetz - GEG). Bundesgesetzblatt, Berlin, 2020.*
- [23] *Pfluger, B. et al.: „Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland: Modul 3: Referenzszenario und Basiszenario“, Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie. Karlsruhe, Aachen, Heidelberg, 2017.*
- [24] *BDEW. 2015. Smart Grids Ampelkonzept. Ausgestaltung der gelben Ampelphase, Berlin.*

- [25] *Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. 2015. Ein Strommarkt für die Energiewende. Ergebnispapier des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (Weißbuch). BMWi, Berlin.*
- [26] *BDEW. 2018. Elektromobilität als Anwendungsfall des Ampelkonzepts im Verteilnetz, Berlin.*
- [27] *Bundesnetzagentur. 2022. Monitoringbericht 2021, Bonn.*
- [28] *dena. 2017. dena-NETZFLEXSTUDIE. Optimierter Einsatz von Speichern für Netz- und Marktanwendungen in der Stromversorgung, Berlin.*
- [29] *Bundesnetzagentur. 2014. Fahrplananmeldung in Deutschland mit Hilfe des entso-e Scheduling System (ESS), Bonn.*
- [30] *Bundesnetzagentur, Marktstammdatenregister, Bonn.*
- [31] J. Duffie und W. Beckman, *Solar Energy Thermal Processes*, New Jersey: Wiley, 2013.
- [32] R. Perez und R. Steward, „Solar irradiance conversion models“, *Solar Cells*, Vol. 18, No. 3-4, [https://doi.org/10.1016/0379-6787\(86\)90120-1](https://doi.org/10.1016/0379-6787(86)90120-1), pp. 231-222, 1986.
- [33] R. Perez, R. Seals, P. Ineichen, R. Steward und D. Menicucci, „A new simplified of the Perez diffuse irradiance model for tilted surfaces“, *Solar Energy*, Vol. 39, No. 3, [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(87\)80031-2](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(87)80031-2), pp. 221 - 231, 1987.
- [34] S. Winter, *Modellierung und marktorientiertes Lastmanagement von Haushaltslasten*; ISBN 13: 978-3-86844-873-3 / -0, Göttingen: Sierke Verlag, 2016.
- [35] T. Tjaden, J. Bergner, J. Weniger und V. Quaschnig, „Repräsentative elektrische Lastprofile für Einfamilienhäuser in Deutschland auf 1-sekündiger Datenbasis, Datensatz“, Hochschule für Technik und Wirtschaft (HTW) Berlin, Lizenz: CC-BY-NC-4.0, 2015.
- [36] BDEW, 2022, „BDEW-Strompreisanalyse Juli 2022 - Haushalte und Industrie (Stand 21.07.2022),“ Berlin.
- [37] J. Christoffer, T. Deutschländer und M. Webs, *Testreferenzjahre von Deutschland für mittlere und extreme Witterungsverhältnisse TRY*, Offenbach: Deutsche Wetterdienst (DWD), 2004.
- [38] Verbraucherzentrale NRW, „Energieberatung - Solarstrom und Batteriespeicher“, Verbraucherzentrale NRW, Düsseldorf, 2019.

- [39] *World Steel Association (worldsteel): Life cycle inventory methodology report for steel products. Brussels, Belgium, 2017.*
- [40] *Deutscher Bundestag: Bundes-Klimaschutzgesetz (KSG) mit Änderung durch Art. 1 G v. 18.8.2021 (BGBl. I S. 3905). Bundesgesetzblatt, Berlin, Deutschland, 2021.*
- [41] *Deutscher Bundestag: Gesetz zur Reduzierung und zur Beendigung der Kohleverstromung und zur Änderung weiterer Gesetze (Kohleaustiegsgesetz). Bundesgesetzblatt, Berlin, 2020.*

Anhang

A.1 Betriebszustandskonzepte für Windheizung 2.0 Speicherkonzepte

A.1.1 Betriebszustände des HTSS

Tabelle 30:
Betriebszustände des HTSS.

| HTSS | Zusandsnummer | | | | | | | | | |
|--|--|--|--|---|--|--|--|----------------------------------|--|--|
| | Anlage aus | | Passives Entladen | | Aktives Entladen | | Nachheizen | | Sommer | |
| | - | ohne | TWW | ohne | TWW | ohne | TWW | ohne | TWW | |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | |
| Bedingung | | | | | | | | | | |
| TWW-Laden (TWW_bool) | - | n | TWW_T_oben < 85 °C | n | TWW_T_oben < 85 °C | n | TWW_T_oben < 85 °C | n | TWW_T_oben < 85 °C | |
| Anlagenzustand (tek_state) | 0 | >1 | >1 | >1 | >1 | >1 | >1 | >1 | 1 | |
| Nachheizen Raum | SUMME(tek_EntL_set) = 0 % & tek_Reheat_set = 0 % | tek_EntL_set0 < 5 % & tek_Reheat_set < 5 % | tek_EntL_set0 >= 5 % & tek_Reheat_set < 5 % | tek_EntL_set0 >= 5 % & tek_Reheat_set < 5 % | tek_EntL_set0 >= 5 % & tek_Reheat_set < 5 % | tek_EntL_set0 >= 5 % & tek_Reheat_set < 5 % | tek_Reheat_set >= 5 % | tek_Reheat_set >= 5 % | n | |
| Wärmeanforderung Raum | n | n | n | j | j | j | j | j | n | |
| Beladung | | | | | | | | | | |
| Speicher; Solltemperatur | htss_core_Tset -> htss_core_T | htss_core_Tset -> htss_core_T | htss_core_Tset -> htss_core_T | htss_core_Tset -> htss_core_T | htss_core_Tset -> htss_core_T | htss_core_Tset -> htss_core_T | htss_core_Tset -> htss_core_T | htss_core_Tset -> htss_core_T | htss_core_Tset -> htss_core_T | |
| Heizwendeln; Solltemperatur | htss_HW_Tset -> htss_HW_T | htss_HW_Tset -> htss_HW_T | htss_HW_Tset -> htss_HW_T | htss_HW_Tset -> htss_HW_T | htss_HW_Tset -> htss_HW_T | htss_HW_Tset -> htss_HW_T | htss_HW_Tset -> htss_HW_T | htss_HW_Tset -> htss_HW_T | htss_HW_Tset -> htss_HW_T | |
| Volumenstrom Heißluftkreis (Heißluft-Ventilator) | 150m³/h (minimaler VSTR) | 150m³/h (minimaler VSTR) | 350m³/h (TWW-Ladepumpe an) | 200m³/h | 350m³/h (TWW-Ladepumpe an) | 200m³/h | 350m³/h (TWW-Ladepumpe an) | 150m³/h | 350m³/h (TWW-Ladepumpe an) | |
| Solltemperatur Regler Heißluft | 20°C | 20°C | 80°C (TWW-Ladepumpe an) | (75°C-40°C) *tek_EntL_set0 /100% + 40 | 80°C (TWW-Ladepumpe an) | (75°C-40°C) *tek_ReHeat /100% + 40 | 80°C (TWW-Ladepumpe an) | 20°C | 80°C (TWW-Ladepumpe an) | |
| Solltemperatur Zuluft vor elekt. HRG | 15°C | 15°C | 15°C | (55°C-25°C) *tek_EntL_set0 /100% + 25 | 15°C | (55°C-25°C) *tek_ReHeat /100% + 25 => maximale Entladung HTSS | 15°C | 15°C | 15°C | |
| Nachheizung | | | | | | | | | | |
| Heißluftnachheizer | 10°C | 10°C | 10°C | 10°C | 10°C | (55°C-25°C) *tek_ReHeat /100% + 25 | 10°C | 10°C | 10°C | |
| Nachheizer TWW-Speicher (Heizstab) | aus | aus | wenn HTSS_mean < 90°C an= 47°C, aus=52°C (Oberer TWW-Speichersensor) | aus | wenn HTSS_mean < 90°C an= 47°C, aus=52°C (Oberer TWW-Speichersensor) | aus | wenn HTSS_mean < 90°C an= 47°C, aus=52°C (Oberer TWW-Speichersensor) | aus | wenn HTSS_mean < 90°C an= 47°C, aus=52°C (Oberer TWW-Speichersensor) | |
| TWW | | | | | | | | | | |
| Ladepumpe TWW-Speicher | aus | aus | wenn HTSS_mean > 90°C an= 53°C, aus=58°C (Oberer TWW-Speichersensor) | aus | wenn HTSS_mean > 90°C an= 53°C, aus=58°C (Oberer TWW-Speichersensor) | aus | wenn HTSS_mean > 90°C an= 53°C, aus=58°C (Oberer TWW-Speichersensor) | aus | wenn HTSS_mean > 90°C an= 53°C, aus=58°C (Oberer TWW-Speichersensor) | |
| Lüftung | | | | | | | | | | |
| Zuluftventilator | aus | an | an | an | an | an | an | an | an | |
| Abluftventilator | aus | an | an | an | an | an | an | an | an | |

A.1.2 Betriebszustände des BTA-Speichers

Tabelle 31:
Aktueller Stand der Betriebszustände des BTA-Versuchsszenarios.

| BTA mit TWW-Wärmepumpe | Zustandsnummer | | | | | | | | | |
|---|----------------|--------------------------------|-----------------------------------|---------------|------------------------------|--|---|---|---|---|
| | Anlage aus | TWW Sommer | TWW Winter | BTA Laden | BTA Laden + Nachheizten | TWW = Laden Trinkwarmwasserspeicher | | Nachheizten WP | Nachheizten elt | |
| Bedingung | n | 2 | 3 | 4 | 5 | ohne | TWW | 7 | 8 | 9 |
| Anlagenzustand (tek_state) | 0 | 1 | >1 | >1 | >1 | >1 | >1 | >1 | >1 | >1 |
| Wärmeanforderung BTA-Speicher | n | n | n | n | bta_store.T < bta_store.Tset | - | - | - | - | - |
| Nachheizten Raum tek_Reheat_set > 5 % | n | n | n | n | n | n | n | n | n | Nachheizten elt |
| Wärmeanforderung Raum =summe(tek_Entl_set) > 5 % | n | - | - | n | =SUMME(tek_Entl_X_set) > 5 % | =SUMME(tek_Entl_X_set) > 5 % | =SUMME(tek_Entl_X_set) > 5 % | =SUMME(tek_Entl_set) > 5 % & tek_Reheat_set > 5 % | =SUMME(tek_Entl_set) > 5 % & tek_Reheat_set > 5 % | =SUMME(tek_Entl_set) > 5 % & tek_Reheat_set > 5 % |
| Sonstiges | n | WPquelle_VLT - ..._RLT > 0,5 | - | - | - | n | btaTWWWPquelle_VLT - ..._RLT > 0,5 | T_BTA_mean > 17 | T_BTA_mean < 17 | T_BTA_mean < 17 |
| Wärmequelle | | | | | | | | | | |
| Durchlauferhitzer | aus | aus | aus | bta_vf.Tset | bta_vf.Tset | aus | aus | aus | aus | = (45-Regler_Messraum_mittel_110cm_AT)* tek_Reheat/100 +Regler_Messraum_mittel_110cm_AT |
| Wärmepumpe (inkl. Umwälzpumpen) | aus | bta_aE_RLT>17 tww_sp_to->45 | bta_store_RLT>20 tww_sp_to->45 | aus | aus | aus | bta_store_RLT>20 tww_sp_to->45 | bta_store_RLT>20 tww_sp_to->45 | aus | aus |
| TWW-Nachheizten | aus | bta_aE_RLT<17 tww_sp_to->90 | bta_store_RLT<20 tww_sp_to->90 | tww_sp_tu->90 | tww_sp_tu->90 | | bta_store_RLT<20 tww_sp_tu->90 | btaTWWWPstoreT < 50 | aus | aus |
| Umwälzpumpen | | | | | | | | | | |
| Pumpe Durchlauferhitzer | aus | aus | aus | an | an | aus | aus | aus | aus | an |
| Pumpe zum Verteilerbalken BTA | aus | aus | aus | an | an | aus | an | an | aus | aus |
| Pumpe VOM Verteilerbalken BTA | aus | aus | an | aus | aus | an | an | an | aus | aus |
| Pumpe zum Verteilerbalken aktEnt | aus | bta_aE_RLT>17 | aus | an | an | an | an | an | an | an |
| Ventile | | | | | | | | | | |
| Rücklaufbeimischung aktEnt | zu | zu | zu | zu | zu | = (45-Regler_Messraum_mittel_110cm_AT)* max(tek_Entl_X_set)/100 +Regler_Messraum_mittel_110cm_AT | = (45-Regler_Messraum_mittel_110cm_AT)* tek_Reheat/100 +Regler_Messraum_mittel_110cm_AT | = (45-Regler_Messraum_mittel_110cm_AT)* tek_Reheat/100 +Regler_Messraum_mittel_110cm_AT | offen | offen |
| BTA-Umschaltventil | Entl | Entl | Entl | Entl | Lad | Lad | Entl | Entl | Entl | Entl |
| akt Entladung-Ventile (Balken) | zu | zu | zu | zu | zu | geöff/net: =runden(raum(X)_hz; 10Min)/5 (Min / 20 Min) | zu | raum(X)_hz* | raum(X)_hz* | raum(X)_hz* |
| Nachlade-Bypass (Nachheiz-Ventil) | zu | zu | zu | zu | zu | zu | zu | zu | offen | offen |

A.1.3 Betriebszustände WWS

Tabelle 32:

Aktueller Stand der Betriebszustände des Wasserbasierten Wärmespeichers.

| Wasser-Windperiodenspeicher (WWS) | Zustandsnummer | TWW = TWW-Bezug | | | | | | | |
|--------------------------------------|----------------|-----------------|-------------|---------------|-------------|------------|-------------|--------------------|-------------|
| | Anlage aus | WPS Laden | | akt. Entladen | | Nachheizen | | Laden + Nachheizen | |
| | n | ohne | TWW | ohne | TWW | ohne | TWW | ohne | TWW |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| Bedingung | | | | | | | | | |
| Windstrom | - | j | j | - | - | n | n | j | j |
| Präd. Regler Heizung/TWW-Laden | n | j | j | n | n | j | j | j | j |
| Wärmeanforderung Raum | n | n | n | raum_hz | raum_hz | raum_hz | raum_hz | raum_hz | raum_hz |
| | | | | | | | | | |
| Wärmequelle | | | | | | | | | |
| Durchlauferhitzer | aus | 95 °C | 95 °C | aus | aus | aus | aus | 95 °C | 95 °C |
| Nacherwärmung Heizung | aus | aus | aus | aus | aus | wps_hz_vl | wps_hz_vl | wps_hz_vl | wps_hz_vl |
| Nacherwärmung TWW | aus | aus | tww_vl_Tset | aus | tww_vl_Tset | aus | tww_vl_Tset | aus | tww_vl_Tset |
| Umwälzpumpen | | | | | | | | | |
| Pumpe Durchlauferhitzer | aus | an | an | aus | aus | aus | aus | an | an |
| Pumpe zum Verteilerbalken | aus | aus | aus | an | an | an | an | an | an |
| Ventile | | | | | | | | | |
| akt. Entladung-Ventile | zu | raum(X)_hz | raum(X)_hz | raum(X)_hz | raum(X)_hz | raum(X)_hz | raum(X)_hz | raum(X)_hz | raum(X)_hz |
| Rücklaufbeimischung Heizung | 0 % (offen) | wps_hz_vl | wps_hz_vl | wps_hz_vl | wps_hz_vl | 100 % (zu) | 100 % (zu) | 100 % (zu) | 100 % (zu) |

A.1.4 Messdatenverläufe der Betriebszustände

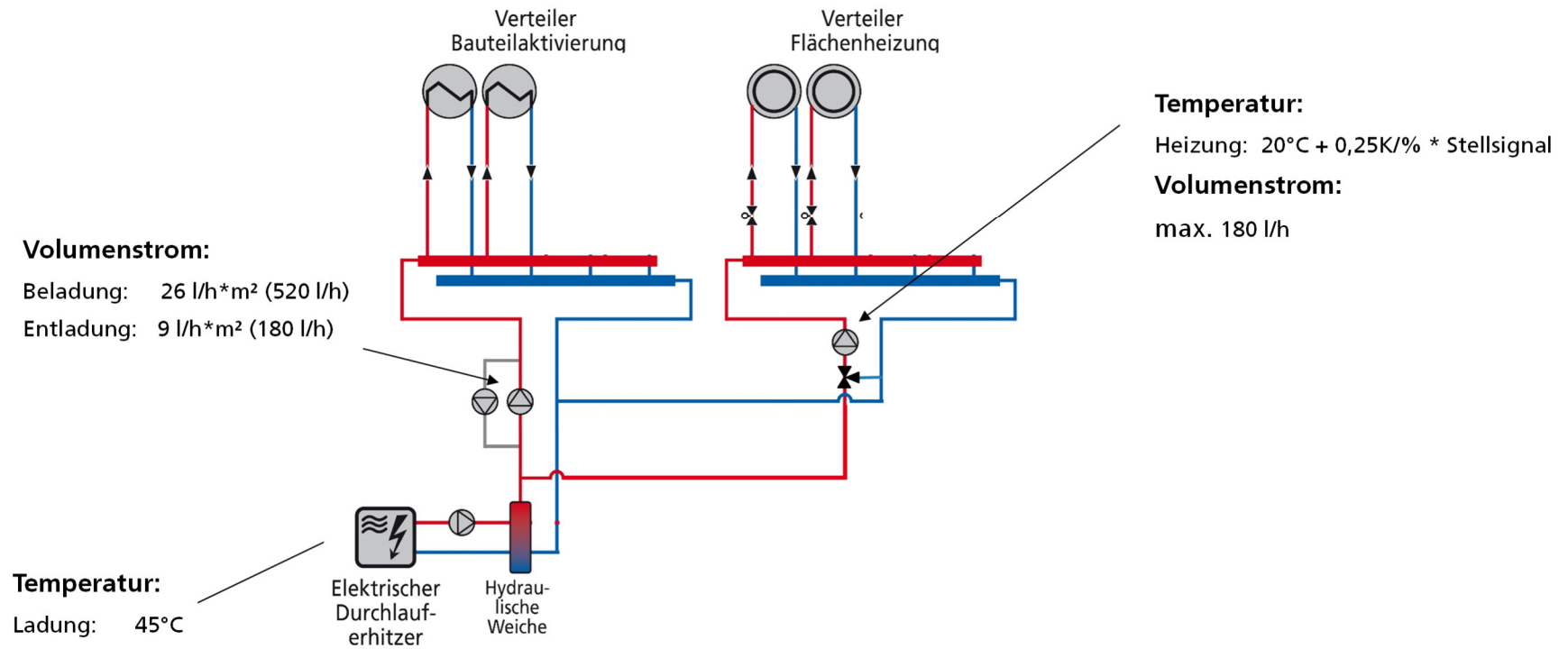
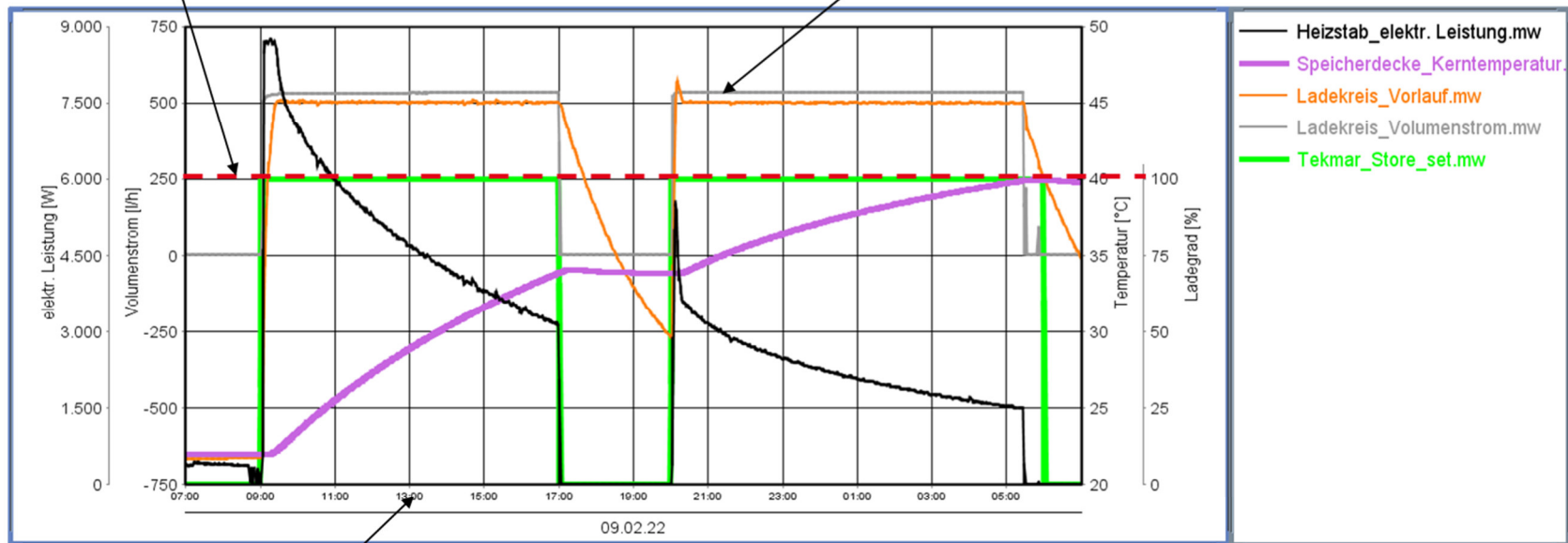


Bild 243:
 Neubau-BTA (CUBE): Schema und Parameter.

maximale Speichertemperatur 40°C

Ladetemperatur 45°C

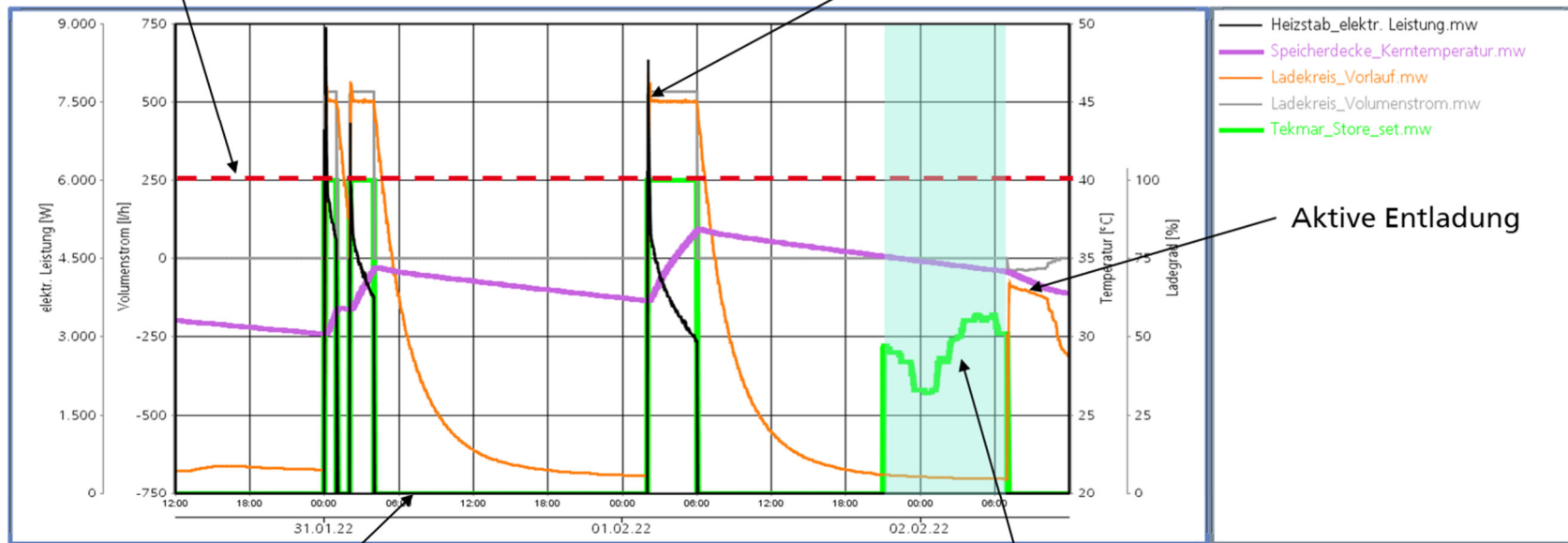


minimale Speichertemperatur 20°C

Bild 244:
CUBE: BTA-Ladung mit Windstrom.

maximale Speichertemperatur 40°C

Ladetemperatur 45°C

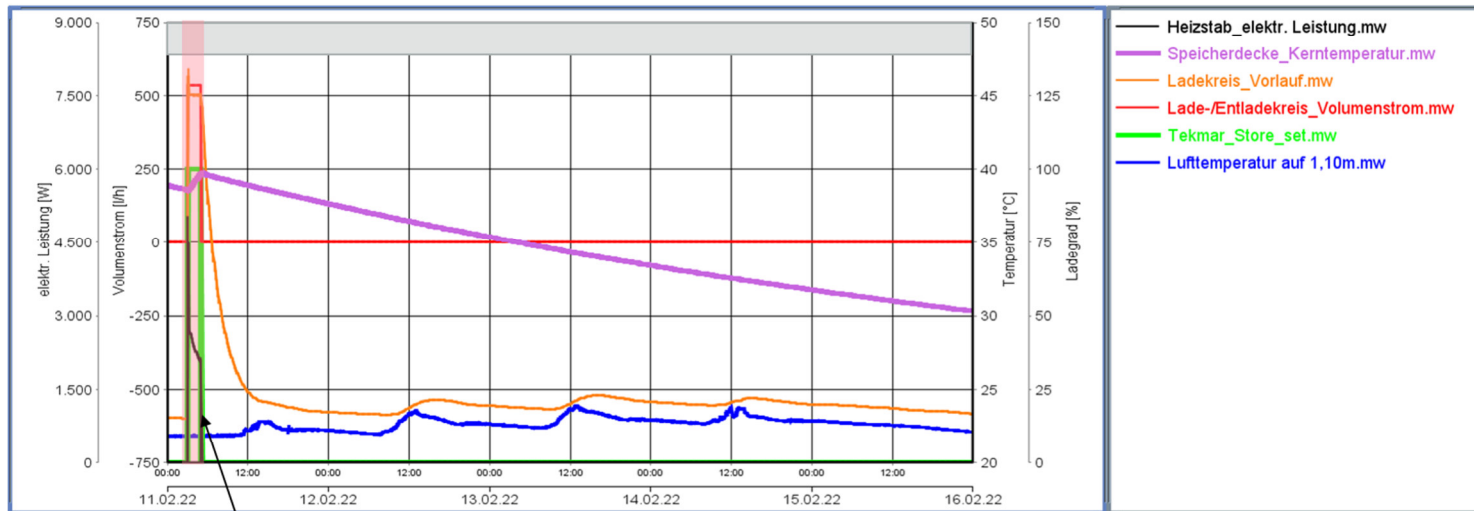


minimale Speichertemperatur 20°C

Tekmar_Store_set < Speicherdecke Kerntemperatur

Bild 245:
CUBE: BTA-Ladung mit Windstrom.

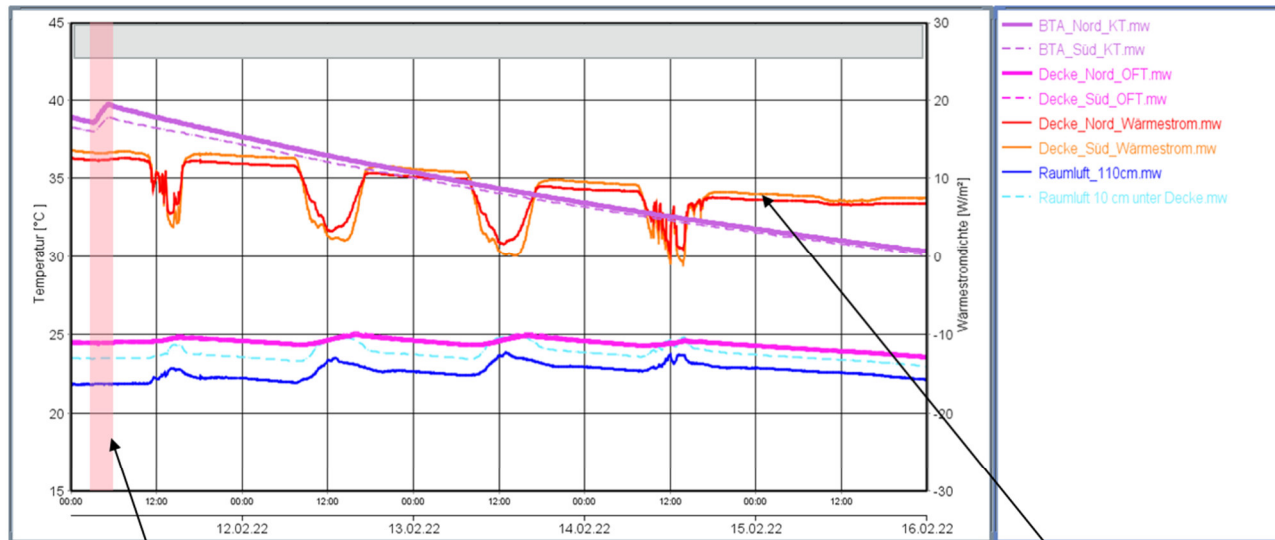
- Passives Entladen
- Aktives Entladen
- Nachheizen
- Warmwasserbereitung



Speicherladung

Bild 246:
CUBE: passive Entladung
Speicherverhalten.

- Passives Entladen
- Aktives Entladen
- Nachheizen
- Warmwasserbereitung

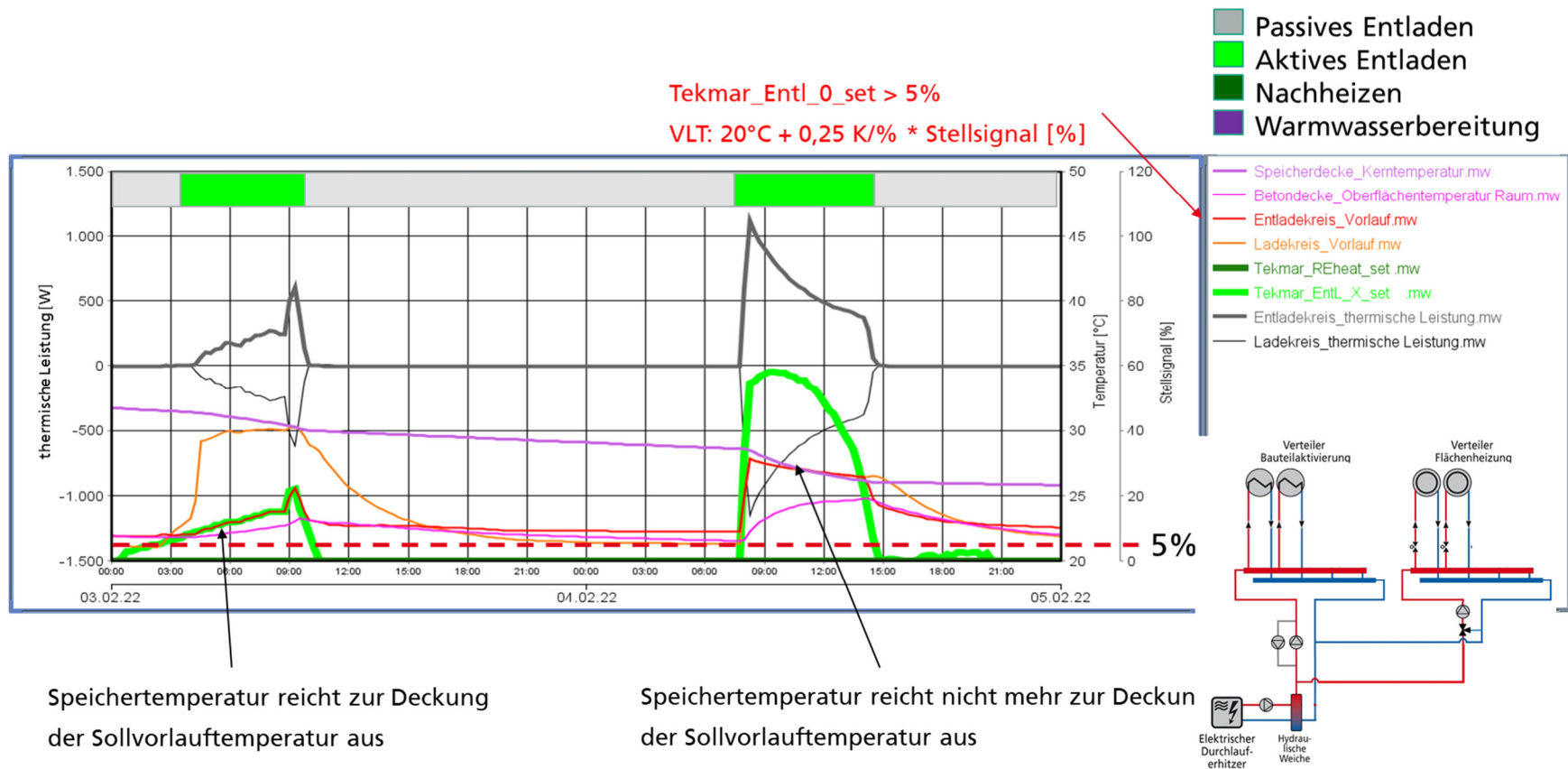


Speicherladung

Messposition raumseitige Oberfläche Betondecke

positiver Wärmestrom bedeutet Wärmeeintrag in Raum

Bild 247:
 CUBE: passive Entladung
 Wärmeeinträge Betondecke (ohne Randeinbindung).



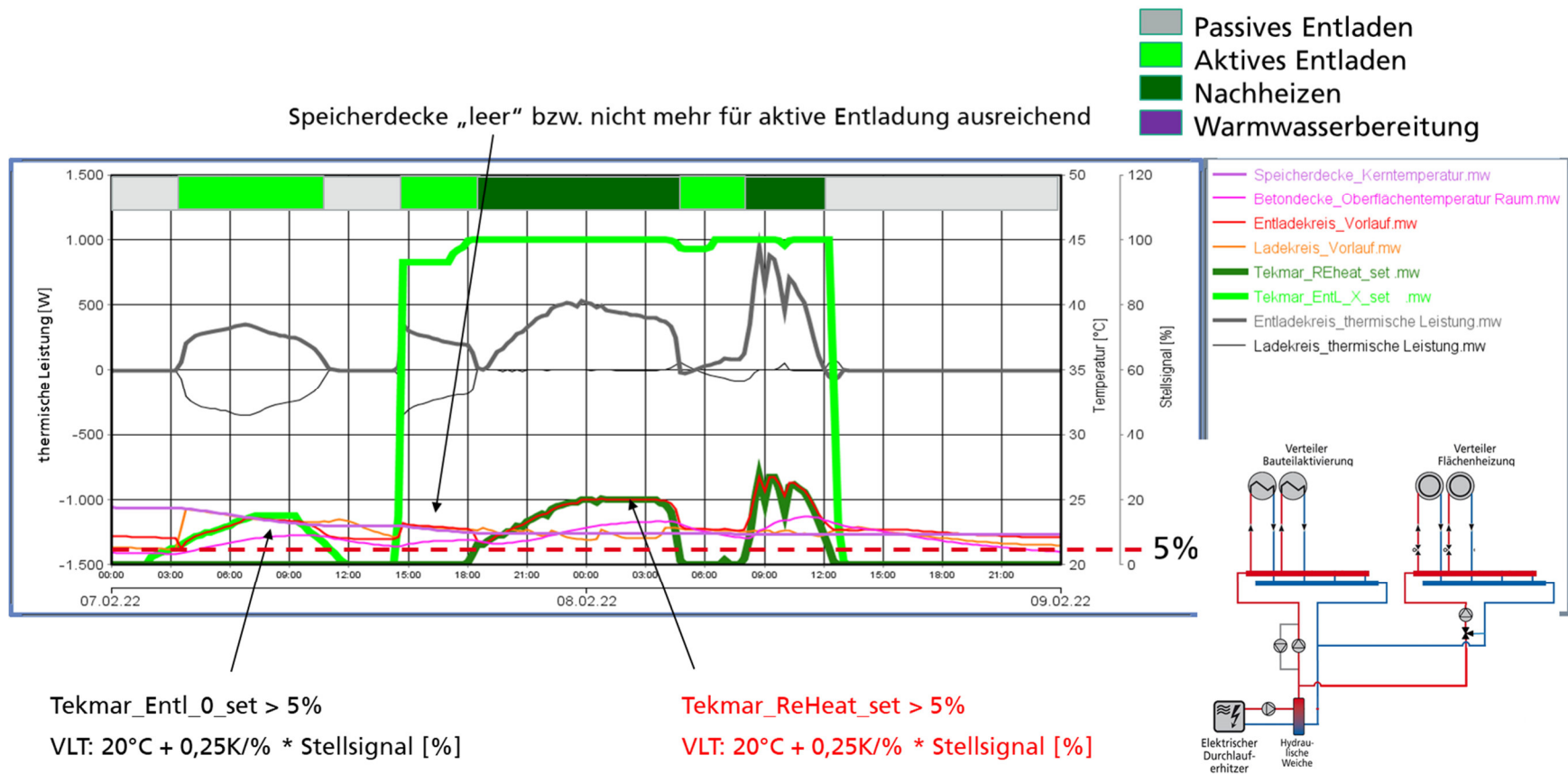
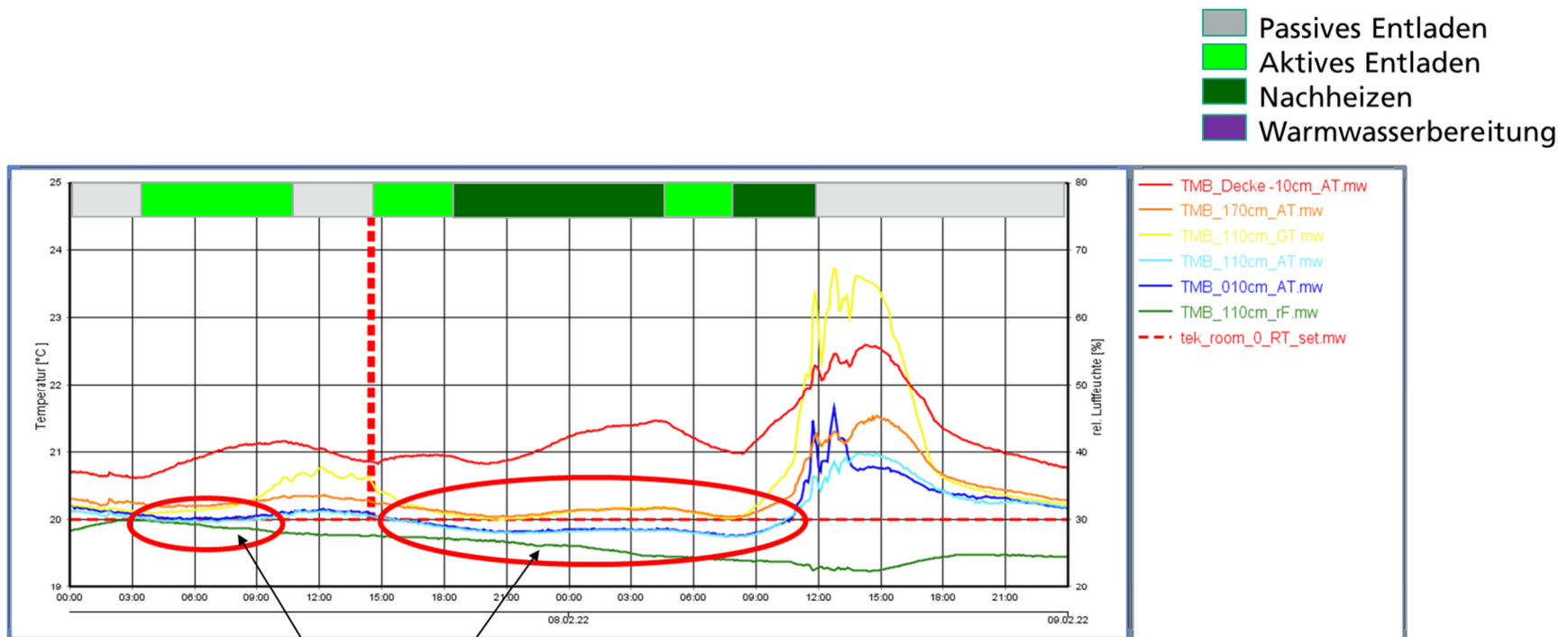
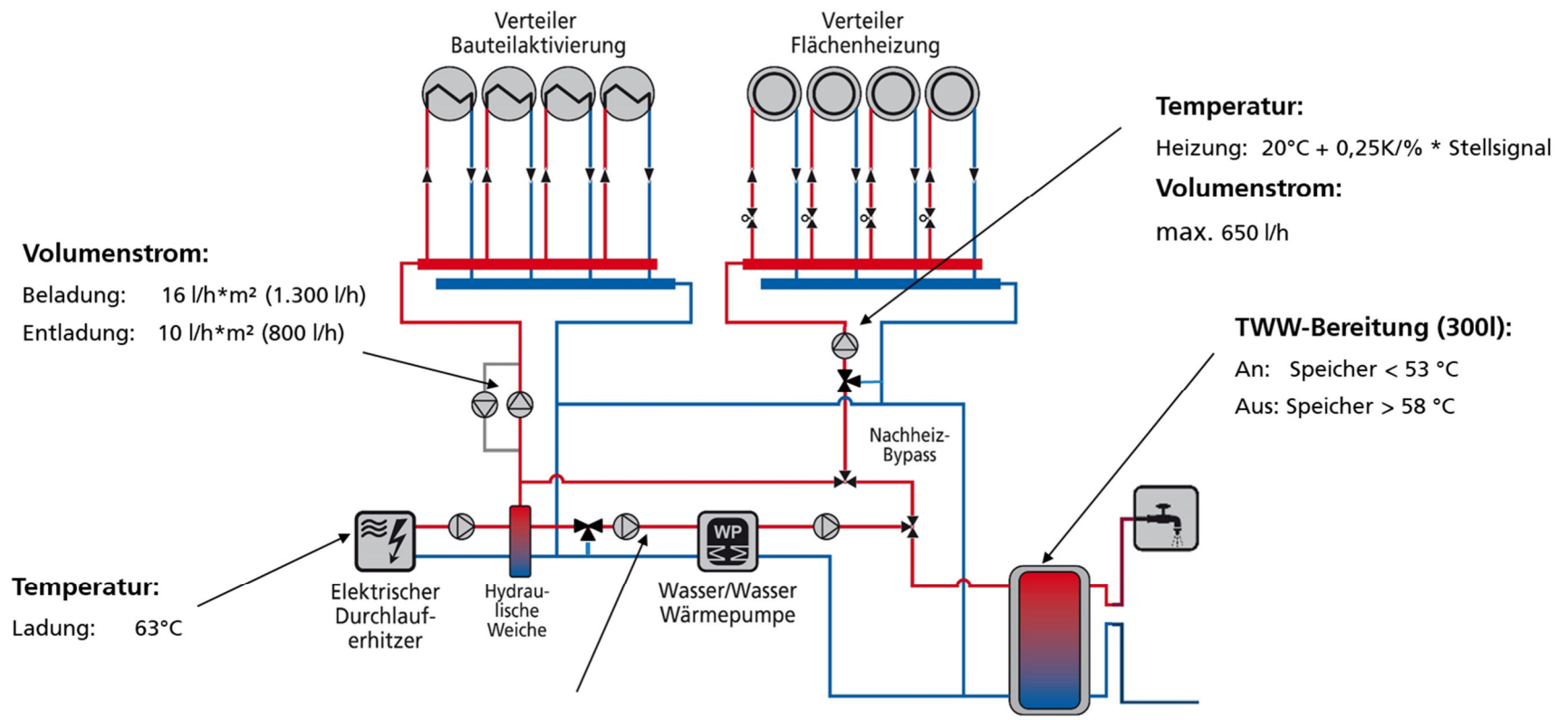


Bild 249:
CUBE: aktive + passive Entladung und Nachheizbetrieb
Speicherverhalten.



Raumtemperatur unterschreitet Sollwert

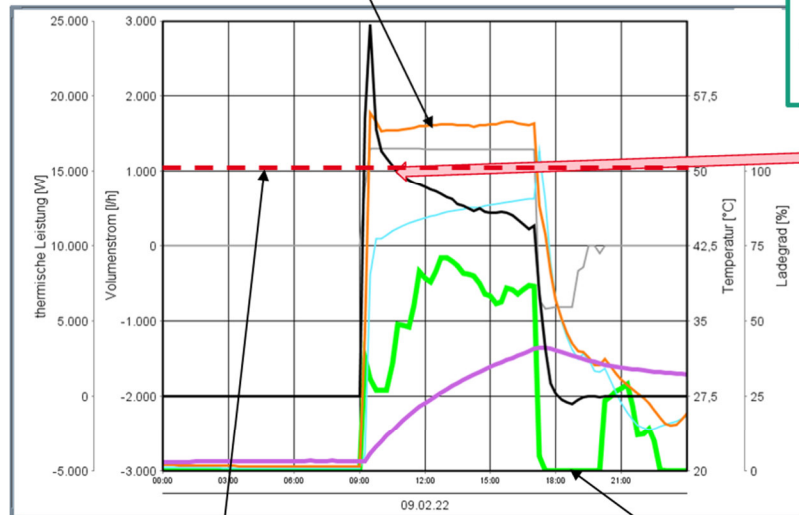
Bild 250:
CUBE: aktive + passive Entladung und Nachheizbetrieb
Raumtemperaturverlauf.



© Fraunhofer IBP

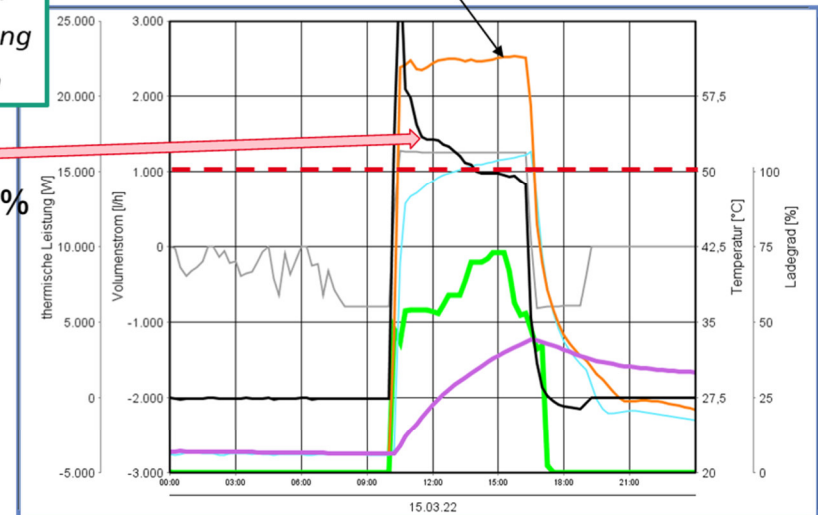
Bild 251:
 Sanierungs-BTA: Schema und Parameter.

Regelung Vorlauftemperatur Ladekreis auf 55°C



Vergleich
Ladeleistung
nach 1h

ca. +15%



maximale Speichertemperatur 50°C

minimale Speichertemperatur 20°C

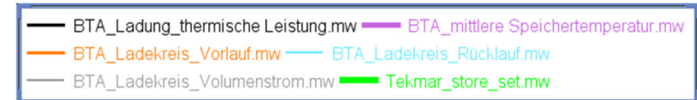


Bild 252:
Sanierungs-BTA: Ladung mit Windstrom.

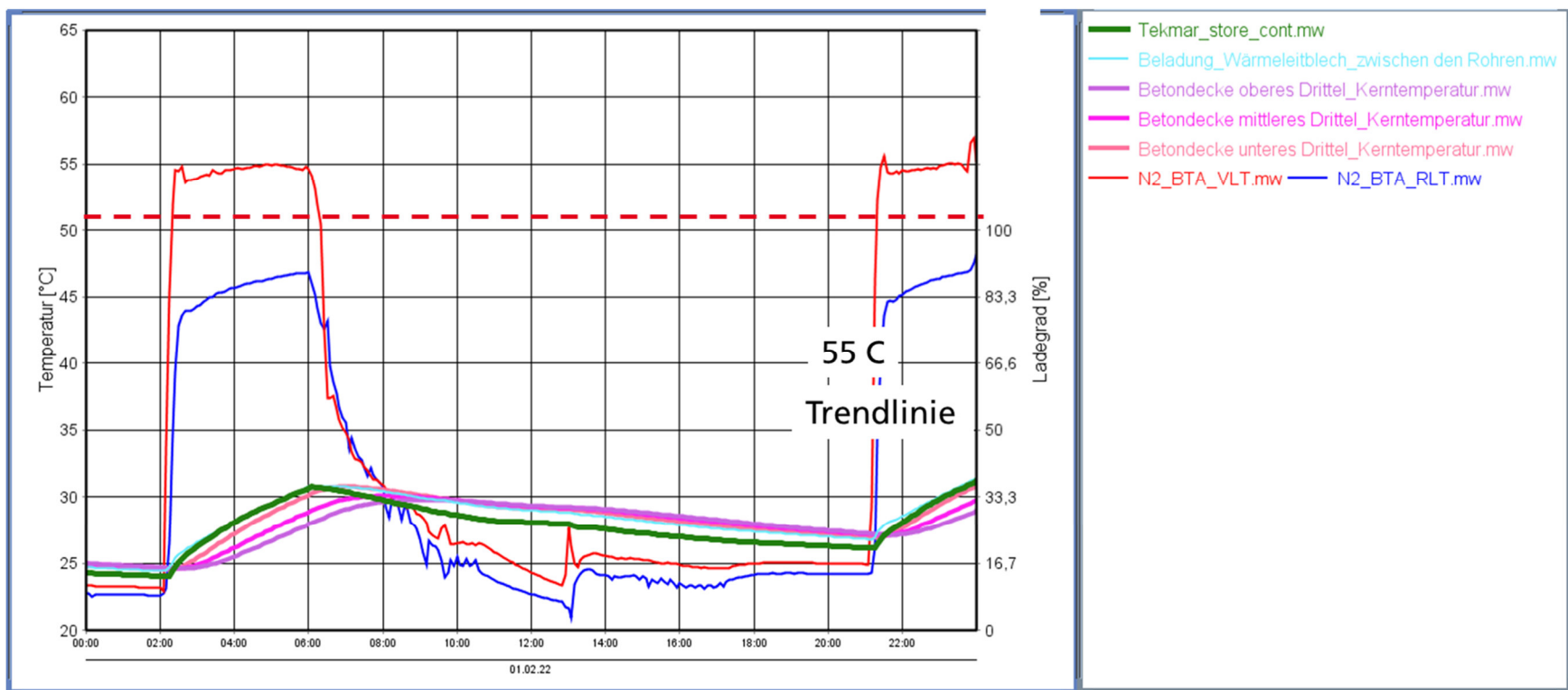


Bild 253:
Sanierungs-BTA: Aufheizverhalten.

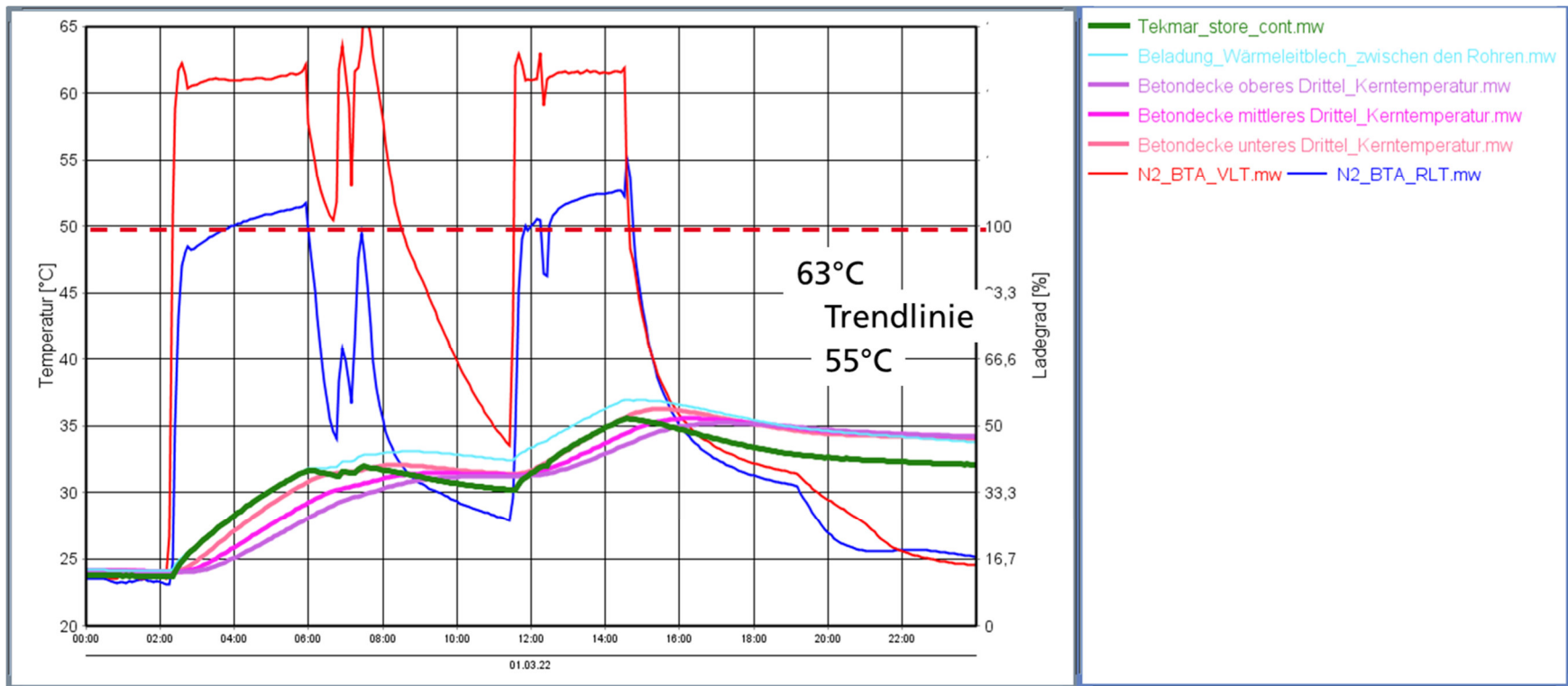
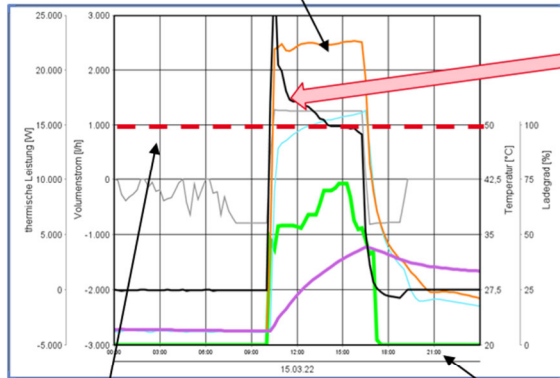


Bild 254:
Sanierungs-BTA: Aufheizverhalten.

Regelung Vorlauftemperatur Ladekreis auf 63°C

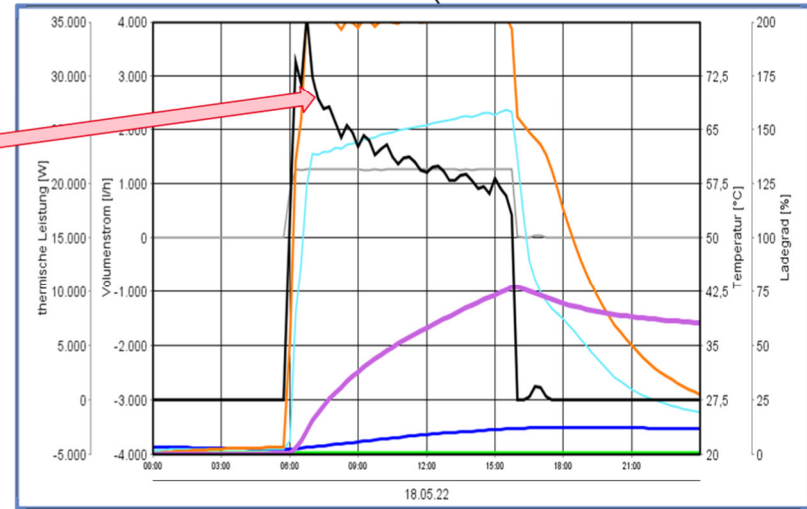


maximale Speichertemperatur 50°C

minimale Speichertemperatur 20°C

Vergleich
Ladeleistung
nach 1h

Versuch nach Ende der Messperiode
Regelung Vorlauftemperatur Ladekreis auf 80°C

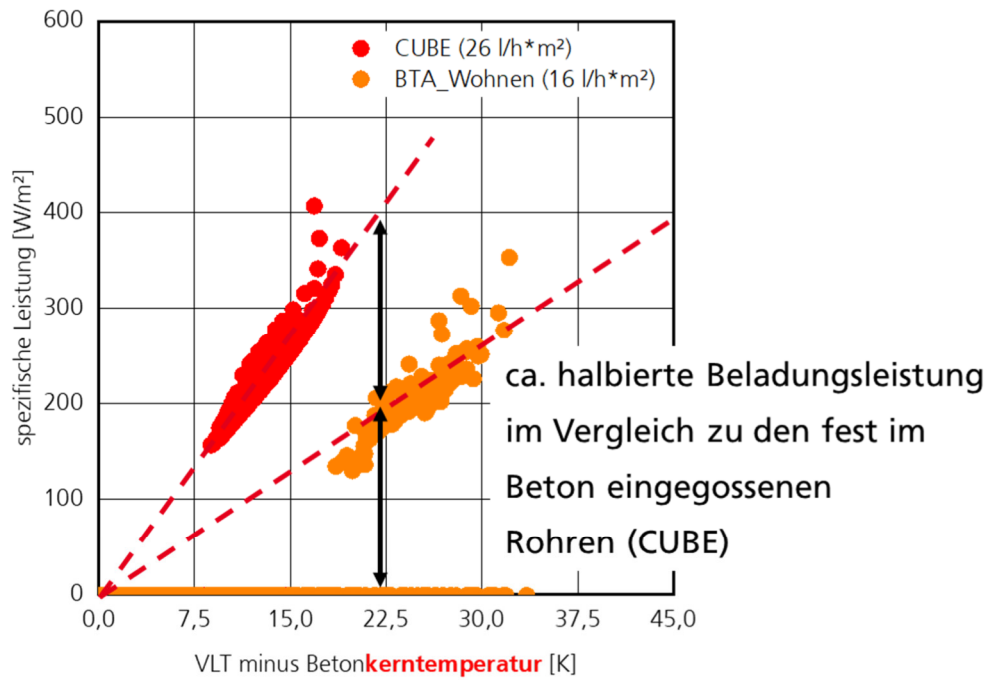


Speicher nach 10 h zu 77% gefüllt



Bild 255:
Sanierungs-BTA: Ladung mit Windstrom.

Vergleich spezifische Beladeleistung



Vergleich spezifische Beladeleistung

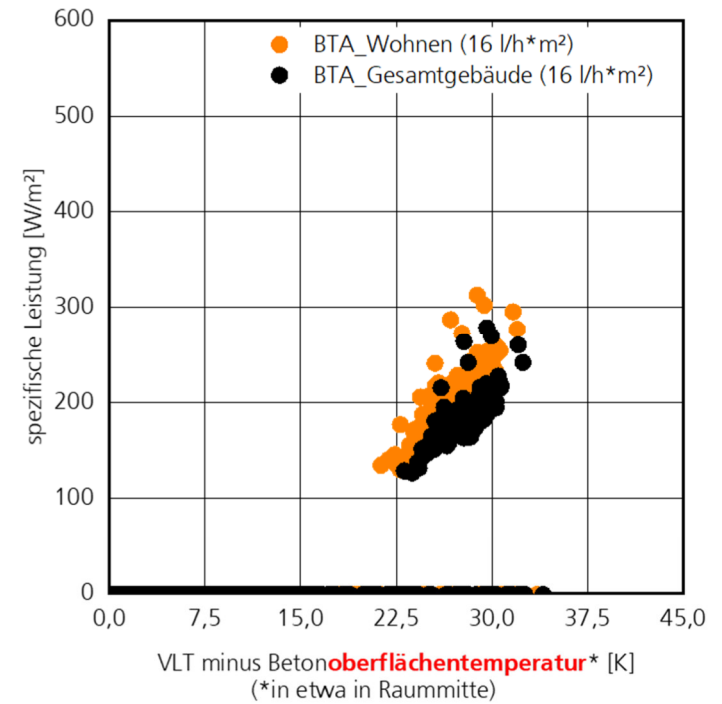
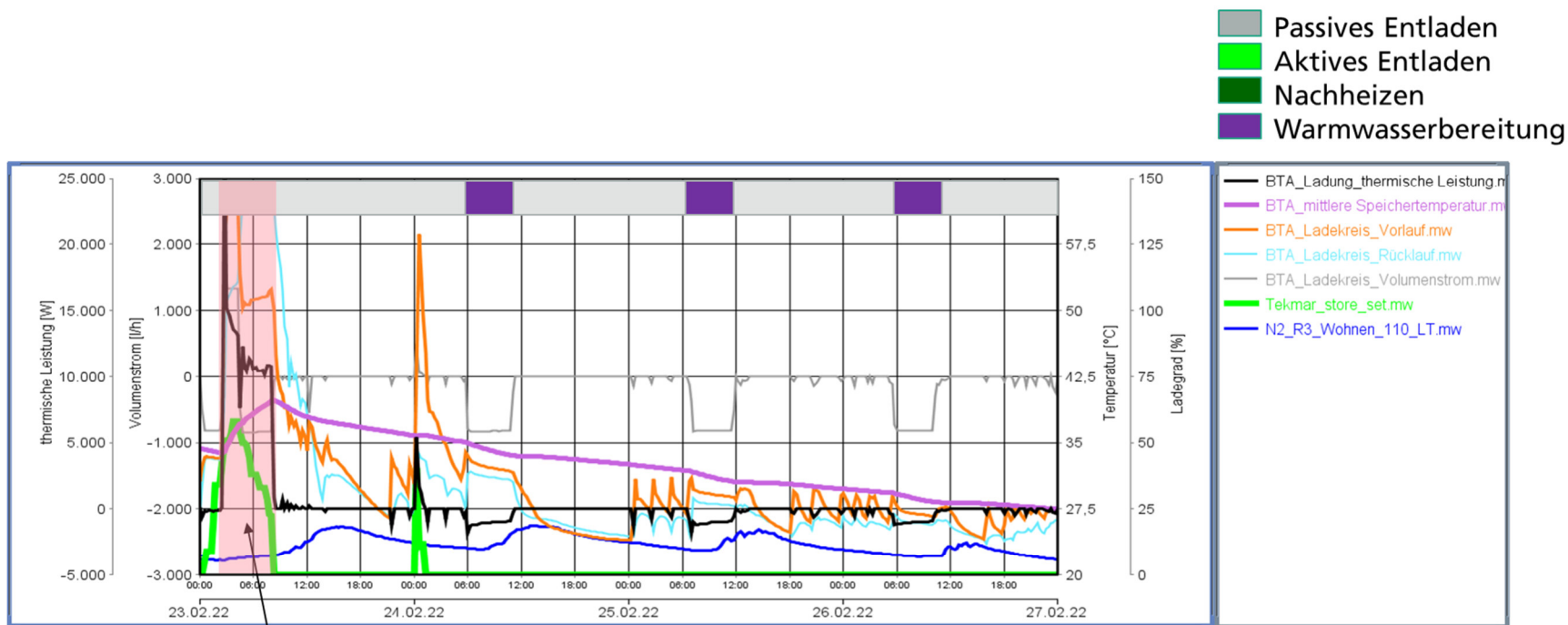
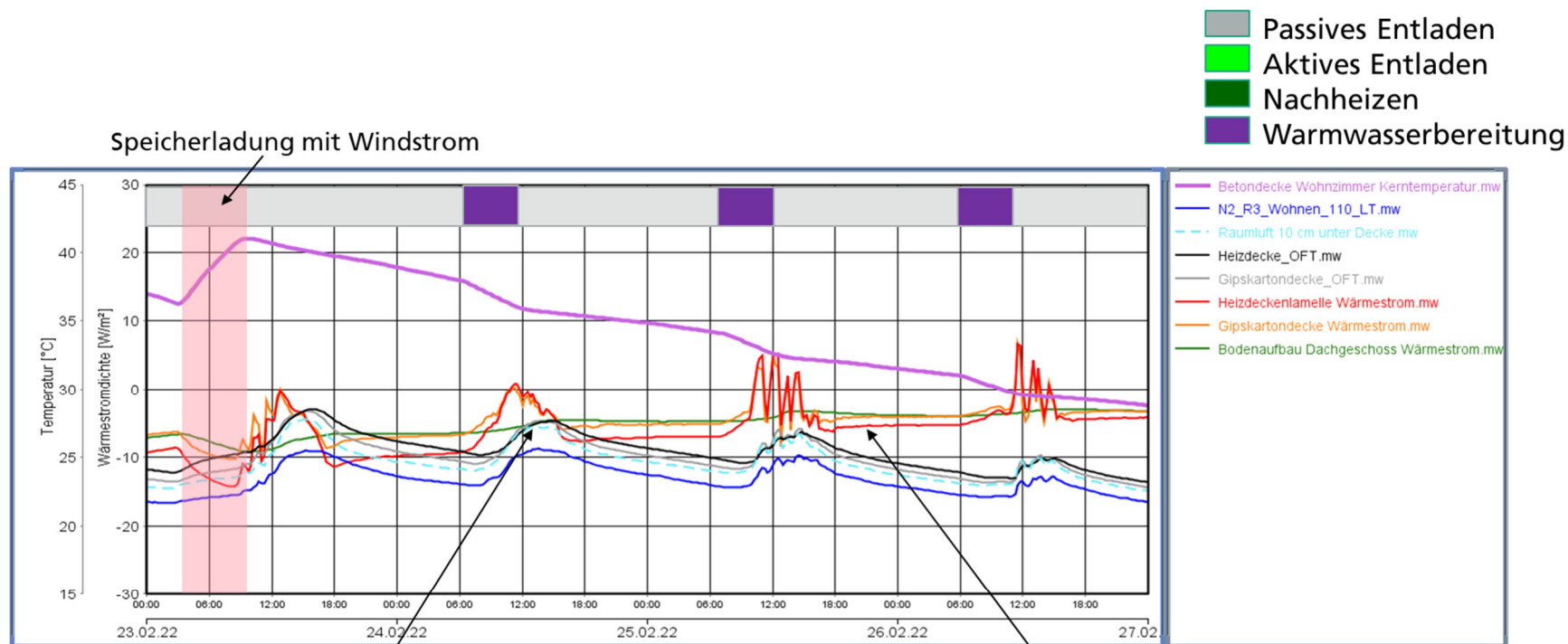


Bild 256:
Aufheizverhalten CUBE (45 °C VLT) vs. Sanierungs-BTA (55 °C VLT).



Speicherladung mit Windstrom

Bild 257:
Sanierungs-BTA: passive Entladung und TWW-Bereitung
Speicherverhalten.



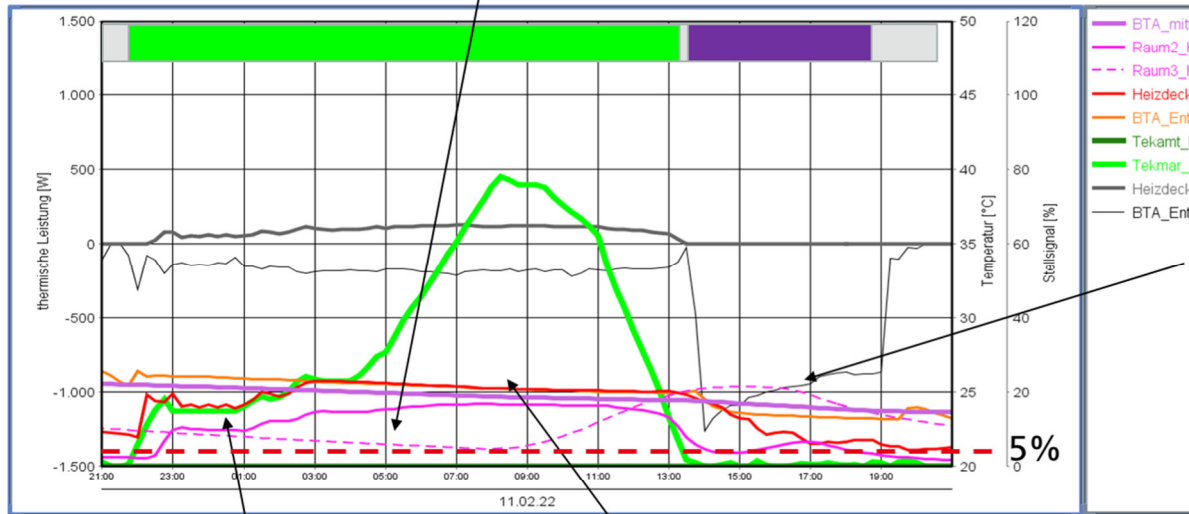
Raumluft steigt aufgrund solarer Gewinne an
=> geringere passive Entladung der BTA

Messposition raumseitige Oberfläche Betondecke
negativer Wärmestrom bedeutet Wärmeverlust der BTA in den Raum

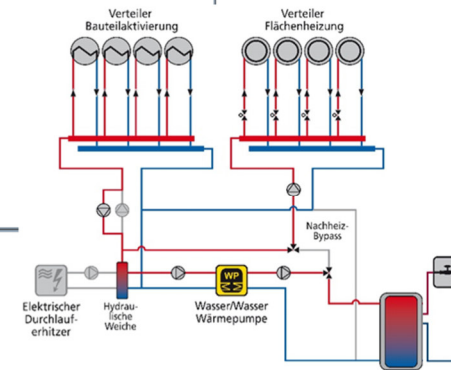
Bild 258:
Sanierungs-BTA: passive Entladung und TWW-Bereitung
Wärmeausträge Betondecke ins EG (ohne Randeinbindung).

Raumweise Beheizung, d.h. während ein Raum heizt (Raum2, Nordwest) benötigt ein anderer keine Heizleistung (Raum3; Südraum mit großer Fensterfläche)

- Passives Entladen
- Aktives Entladen
- Nachheizen
- Warmwasserbereitung



BTA-Entladung für TWW-Bereitung



Tekmar_Entl_0_set > 5%

VLT: $20^{\circ}\text{C} + 0,25\text{K}/\% \cdot \text{Stellsignal} [\%]$

Speichertemperatur reicht nicht mehr zur

Deckung der Sollvorlauftemperatur aus

Bild 259:
Sanierungs-BTA: aktive + passive Entladung und TWW.

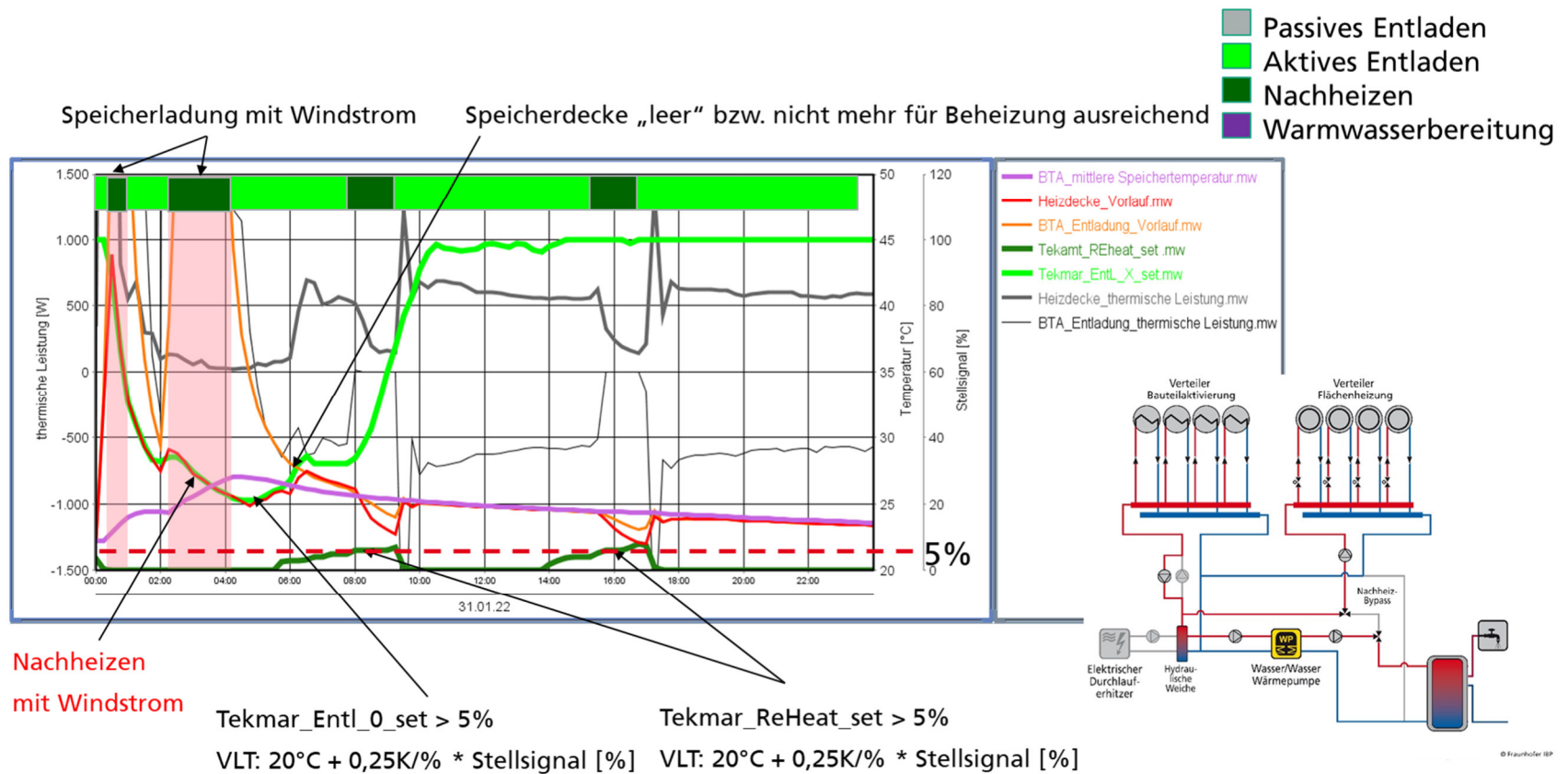


Bild 260:
Sanierungs-BTA: aktive Entladung und Nachheizbetrieb.

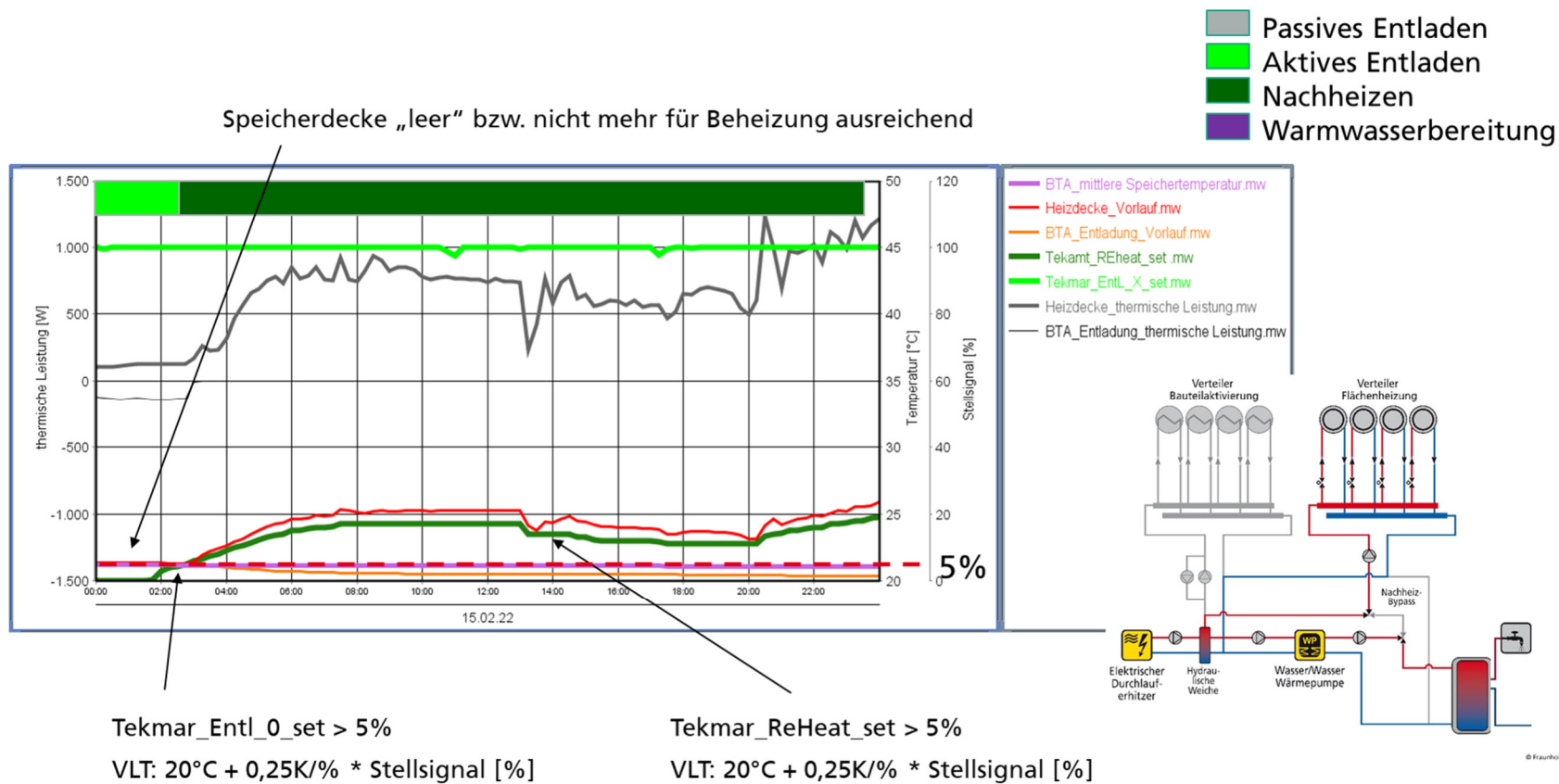
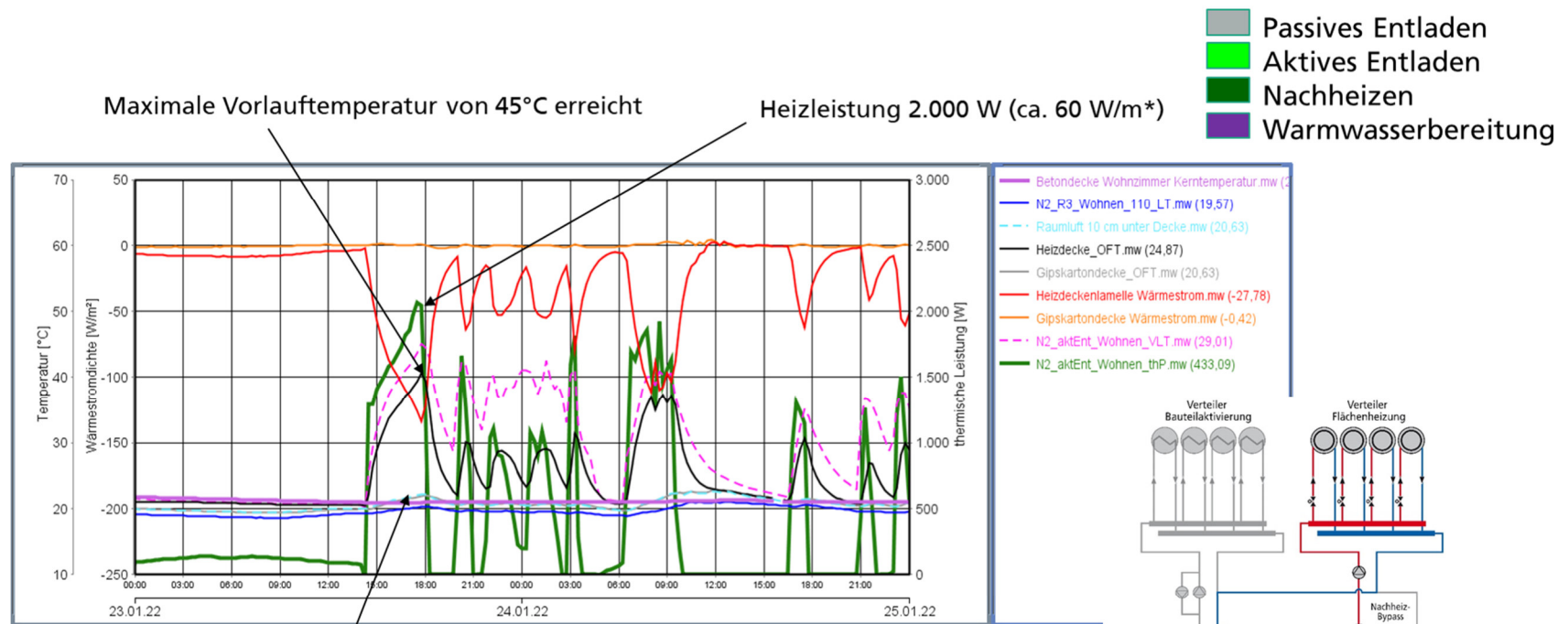


Bild 261:
Sanierungs-BTA: aktive Entladung und Nachheizbetrieb.



Maximale Vorlauftemperatur von 45°C erreicht

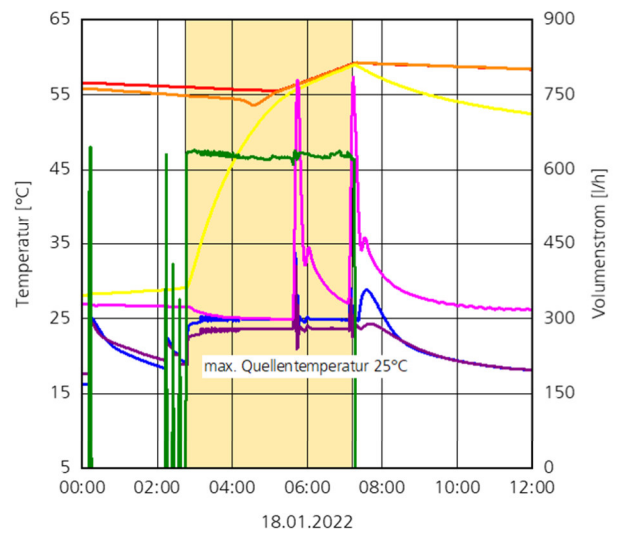
Heizleistung 2.000 W (ca. 60 W/m*)

- Passives Entladen
- Aktives Entladen
- Nachheizen
- Warmwasserbereitung

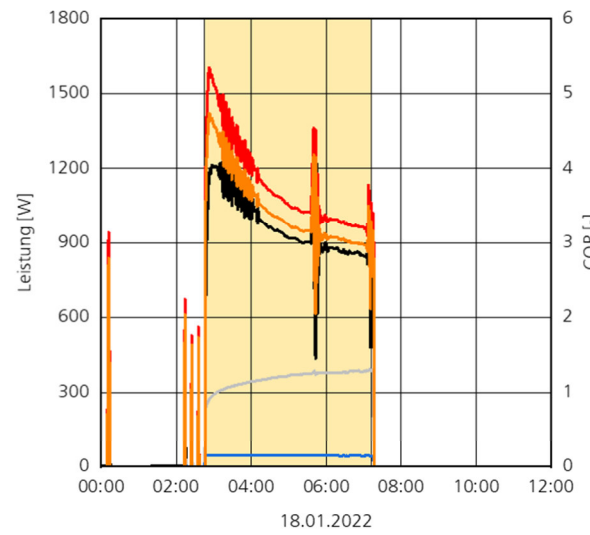
Lufttemperatur 10 cm unter Decke
ca. 2,5 K über Raumlufthtemperatur auf 110cm

* Bezogen auf die gesamte Deckenfläche, nicht auf die Lamellenfläche

Bild 262:
Sanierungs-BTA: Nachheizbetrieb am Beispiel Wohnzimmer.



- N2_TWWP_Quelle_VLT
- N2_TWWP_Quelle_RLT
- N2_WW-Speicher_oben_OFT
- N2_WW-Speicher_mitte_OFT
- N2_WW-Speicher_unten_OFT
- N2_TWWP_Quelle_Vstr
- N2_BTA_VLT.mw



- N2_TWWP_Quelle_thP
- N2_TWWP_Quelle_Pumpe_eIP
- N2_TWWP_COP (inkl. Quellenpumpe)
- N2_TWW_WP_eIP
- N2_TWWP_COP

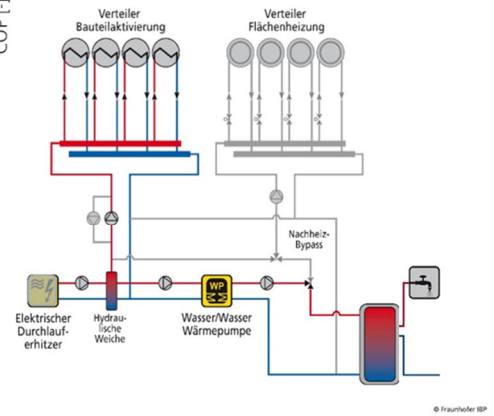
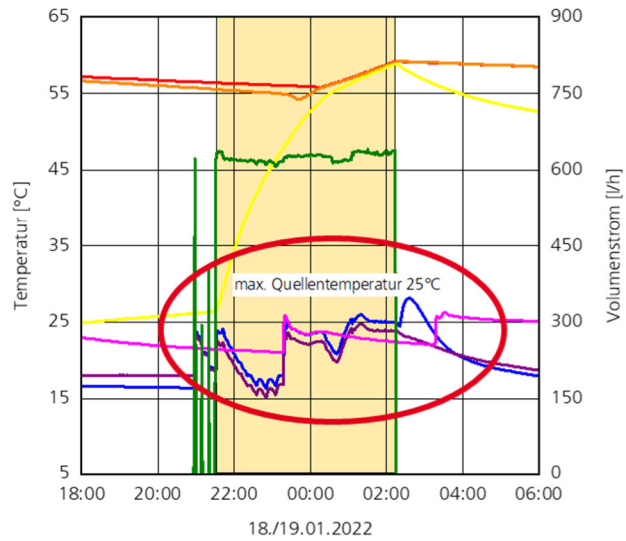
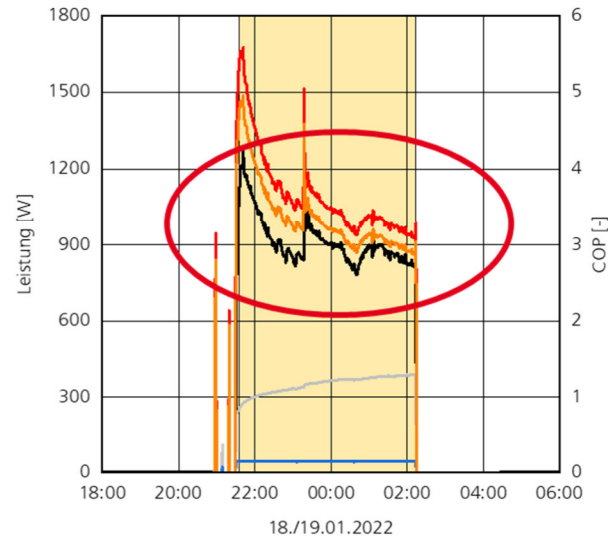


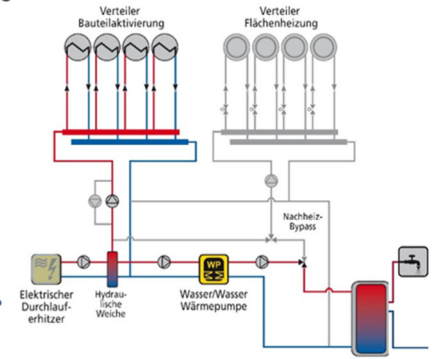
Bild 263:
Sanierungs-BTA: TWW-Bereitung mit Rücklaufwärmepumpe (Dauer ca. 4,5h)
Wärmequelle BTA.



- N2_TWWP_Quelle_VLT
- N2_TWWP_Quelle_RLT
- N2_WW-Speicher_oben_OFT
- N2_WW-Speicher_mitte_OFT
- N2_WW-Speicher_unten_OFT
- N2_TWWP_Quelle_Vstr
- N2_BTA_VLT.mw



- N2_TWWP_Quelle_thP
- N2_TWWP_Quelle_Pumpe_eIP
- N2_TWWP_COP (inkl. Quellenpumpe)
- N2_TWWP_WP_eIP
- N2_TWWP_COP



© Fraunhofer IBP

Bild 264:
Sanierungs-BTA: TWW-Bereitung mit Rücklaufwärmepumpe
Einfluss Quelltemperatur auf COP.

Zusatzeffekt sommerliche Raumkühlung, ca. 900 W Kühlleistung

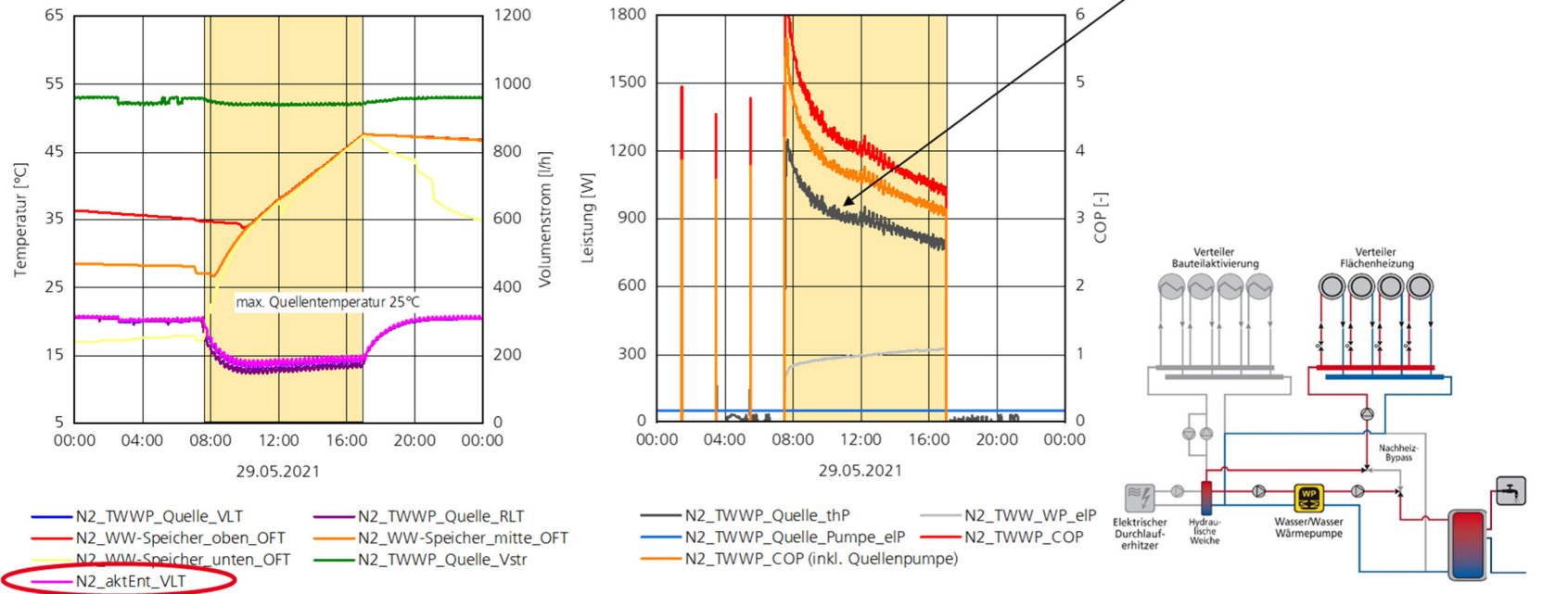


Bild 265:
Sanierungs-BTA: TWW-Bereitung mit Rücklaufwärmepumpe
Wärmequelle Entladesystem (Deckenheizung/-kühlung).

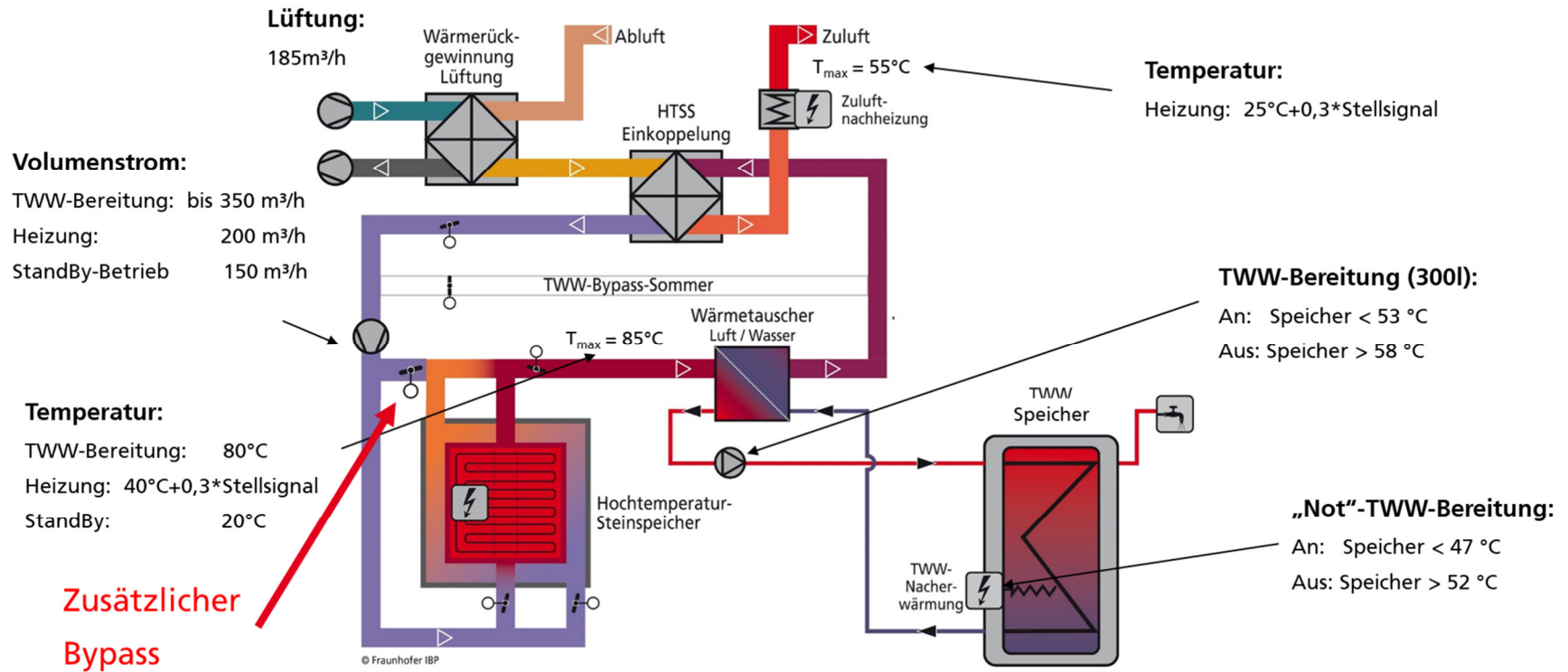
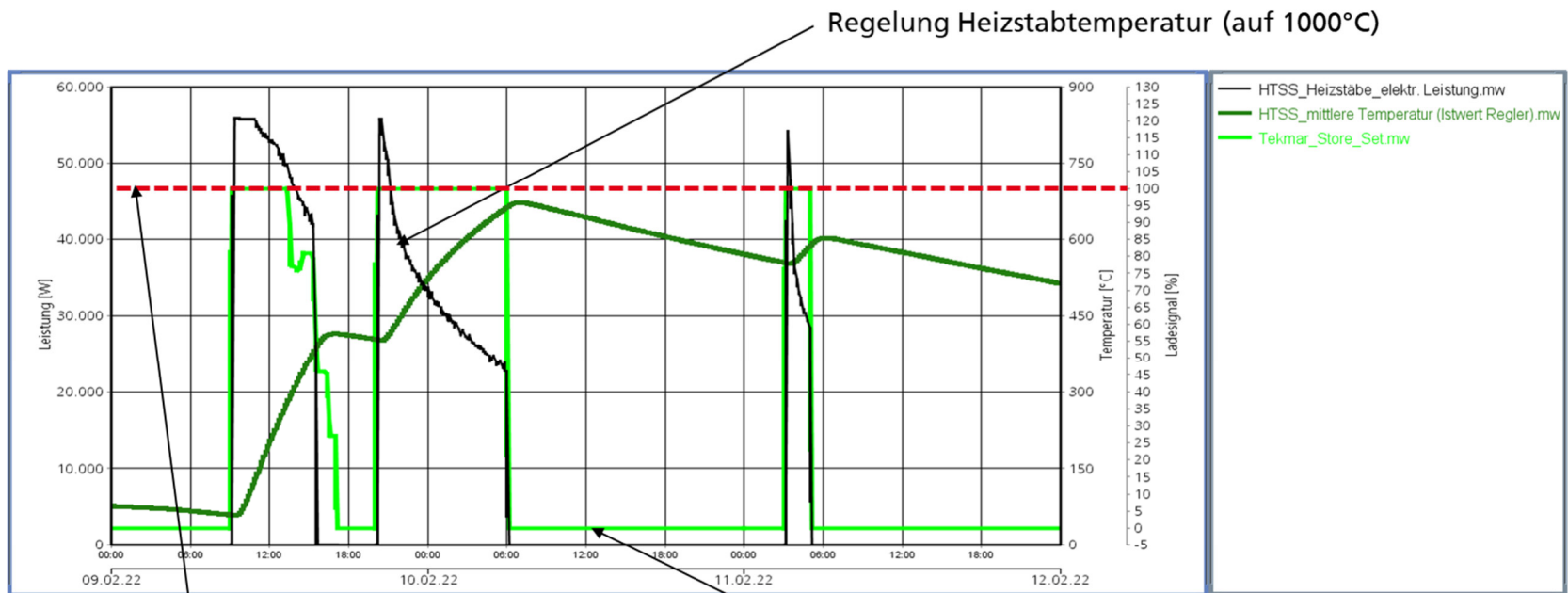


Bild 266:
HTSS: Schema und Parameter.



maximale Speichertemperatur 700°C

minimale Speichertemperatur 25°C

Bild 267:
HTSS: Ladung mit Windstrom.

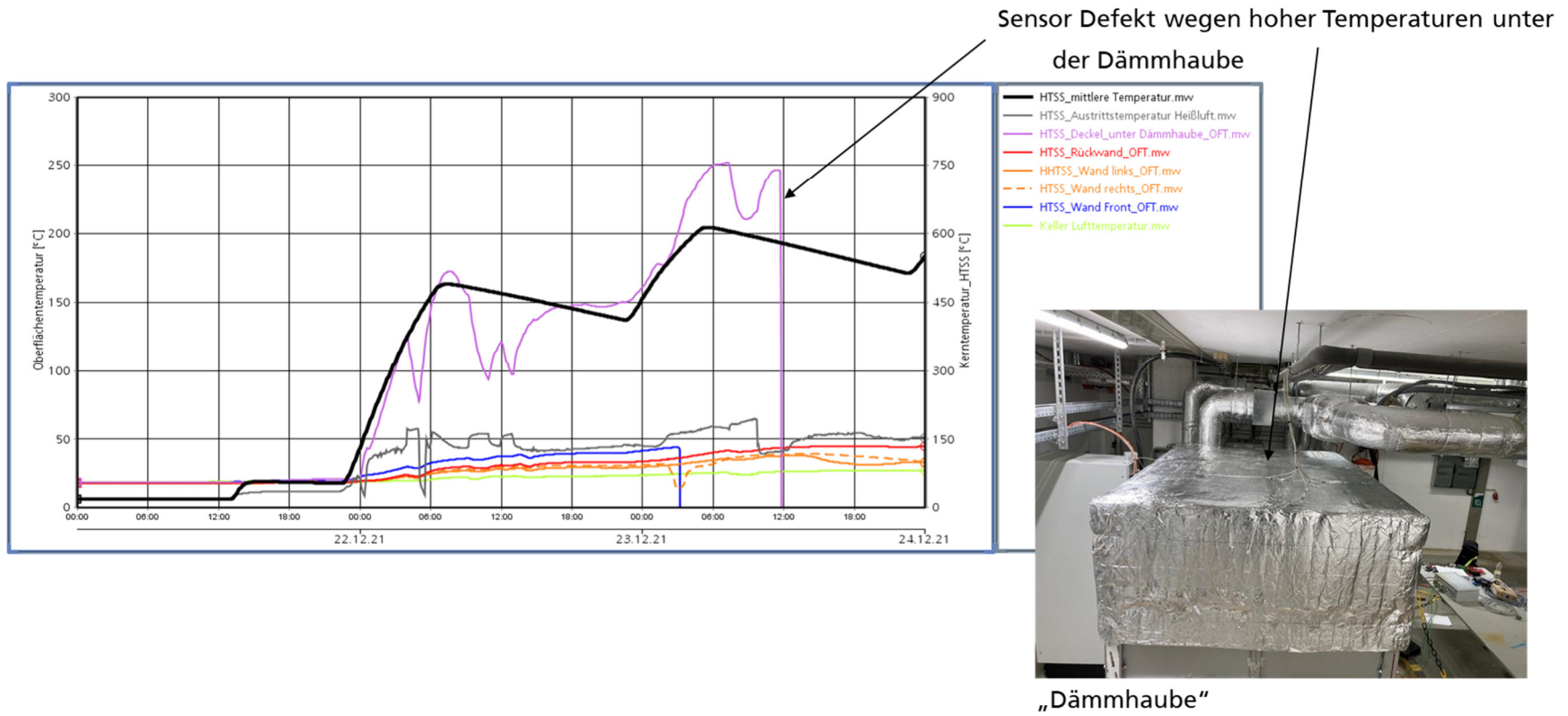


Bild 268:
HTSS: Oberflächentemperaturen.

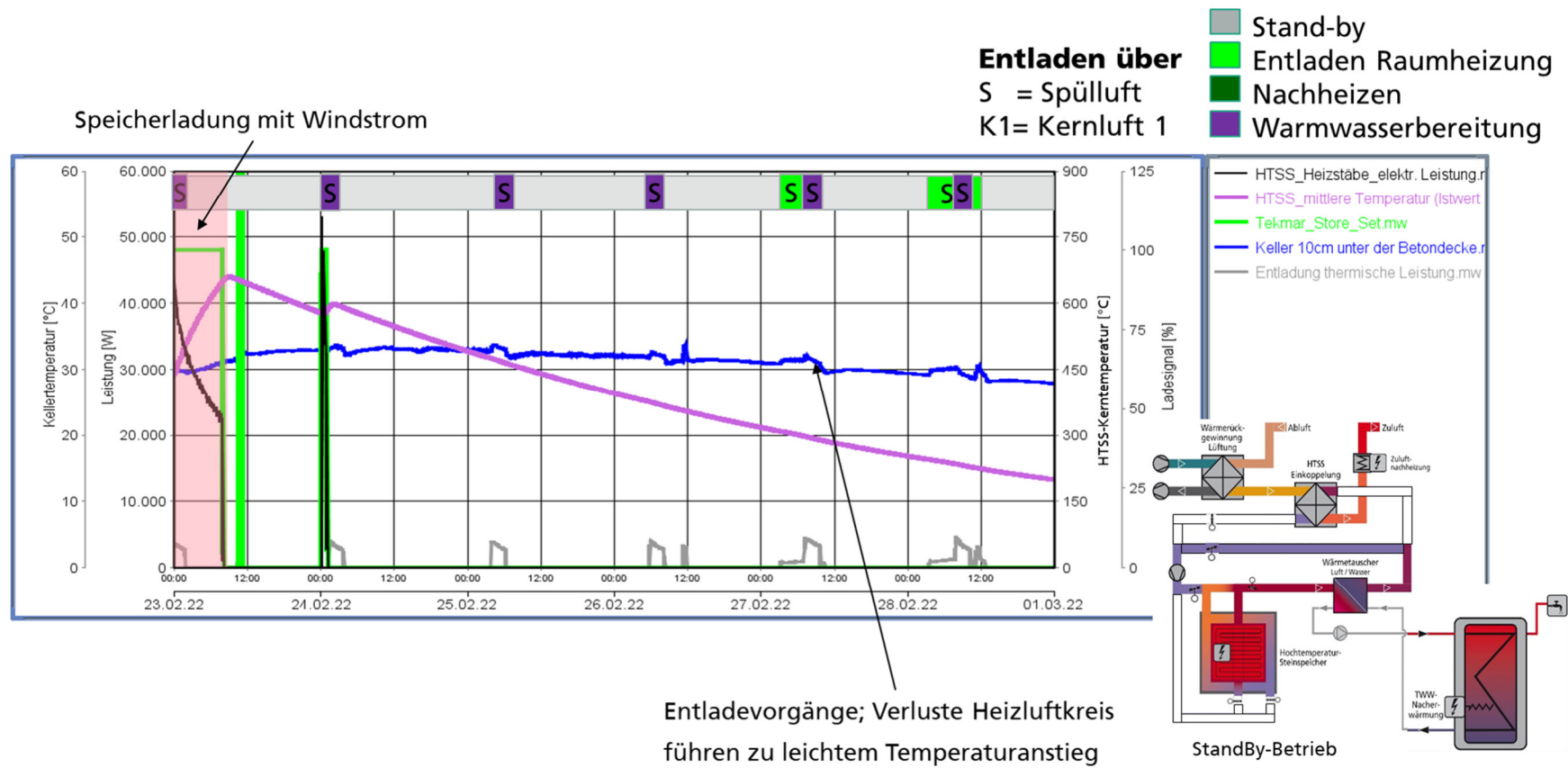


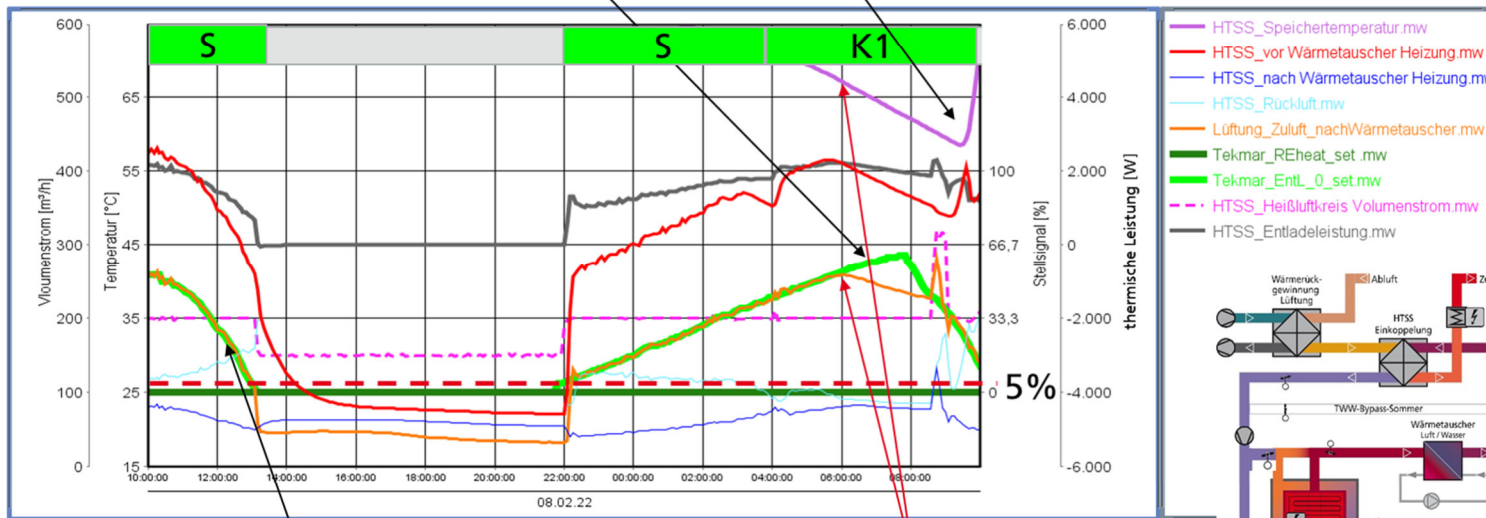
Bild 269:
 HTSS: Wärmeverluste im Standby-Betrieb + TWW-Bereitung.

HTSS-Temperatur reicht nicht mehr aus um Sollwert-Temperatur der Zuluft zu erreichen

Neuer Ladevorgang mit Windstrom

Entladen über
 S = Spülluft
 K1= Kernluft 1

Stand-by
 Entladen
 Nachheizen
 Warmwasserbereitung



Tekmar_Entl_0_set > 5%
 $25^{\circ}\text{C} + 0,3\text{K}/\% \cdot \text{Stellsignal} [\%]$

Bei einer Speichertemperatur von 67°C wird eine maximale Temperatur von 42°C in der Zuluft erreicht (bei $200\text{m}^3/\text{h}$)

Bild 270:
 HTSS: Entladung.

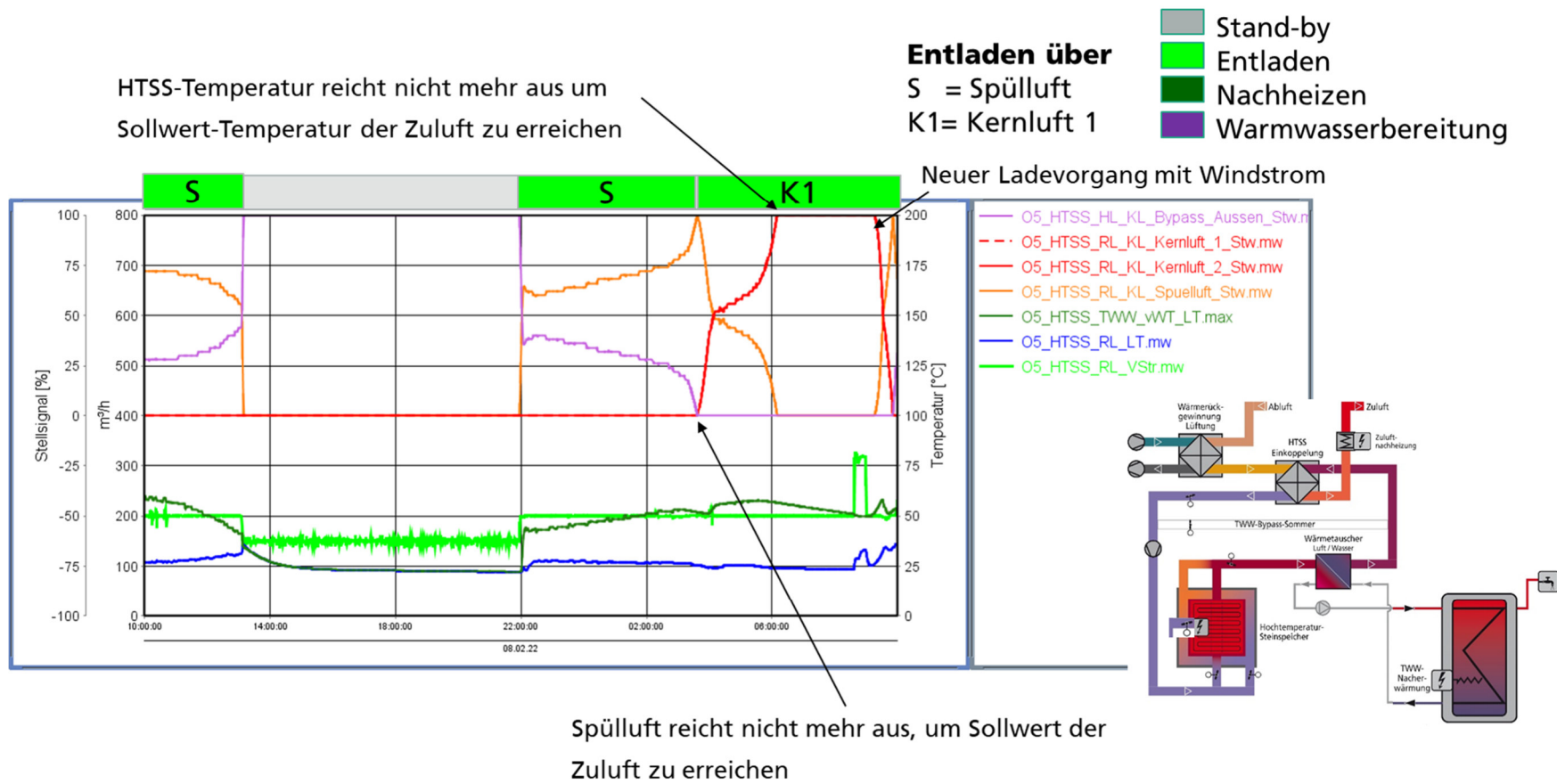


Bild 271:
HTSS: Entladung.

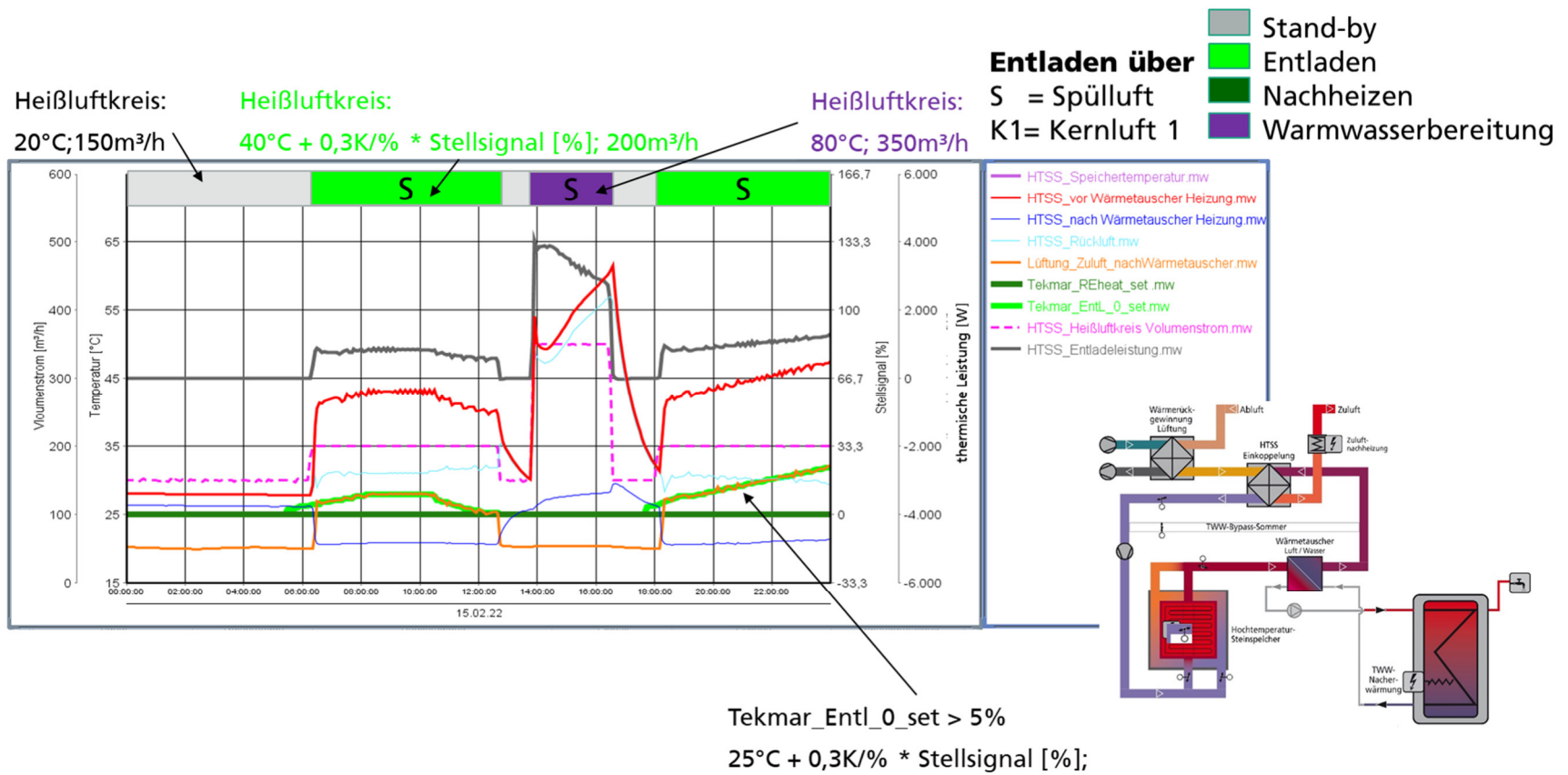


Bild 272:
HTSS: Entladung und TWW-Bereitung.

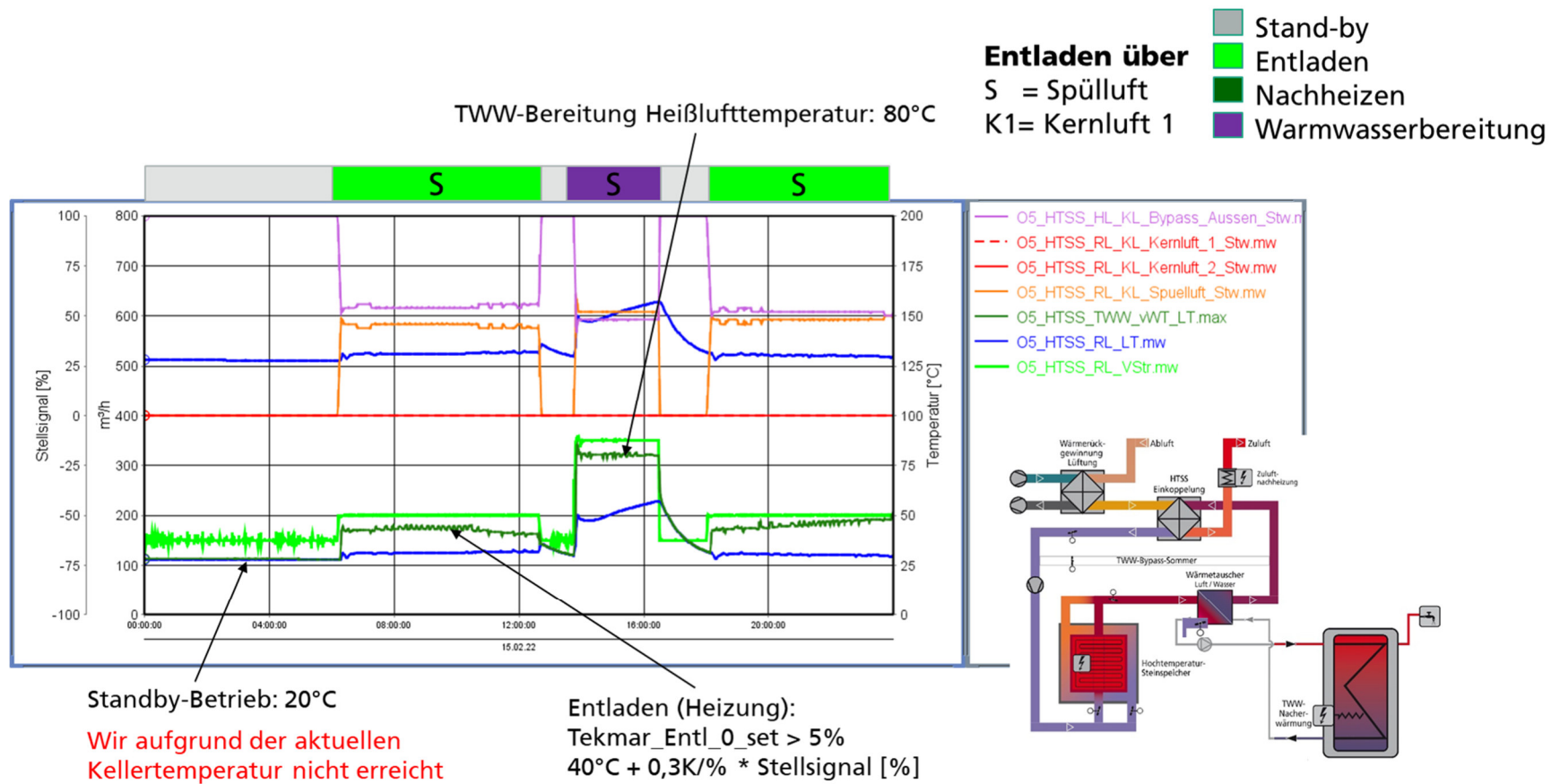
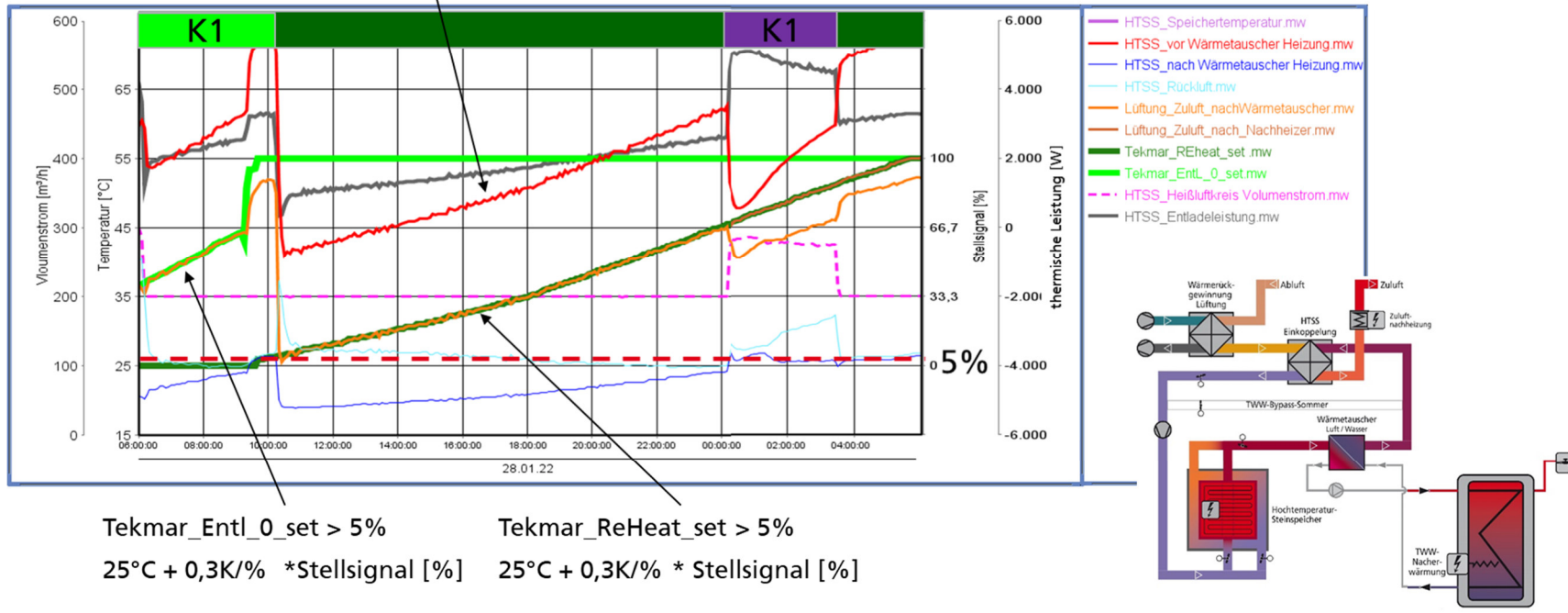


Bild 273:
HTSS: Entladung und TWW-Bereitung.

Heißluftkreis: $40^{\circ}\text{C} + 0,3\text{K}/\% \cdot \text{Stellsignal} [\%]$

Entladen über
 S = Spülluft
 K1= Kernluft 1

Stand-by
 Entladen
 Nachheizen
 Warmwasserbereitung



Tekmar_Entl_0_set > 5% Tekmar_ReHeat_set > 5%
 $25^{\circ}\text{C} + 0,3\text{K}/\% \cdot \text{Stellsignal} [\%]$ $25^{\circ}\text{C} + 0,3\text{K}/\% \cdot \text{Stellsignal} [\%]$

„Restwärme“-HTSS wird bei ReHeat-Betrieb zur Vorerwärmung genutzt

Bild 274:
 HTSS: Entladung, Nachheizbetrieb und TWW-Bereitung.

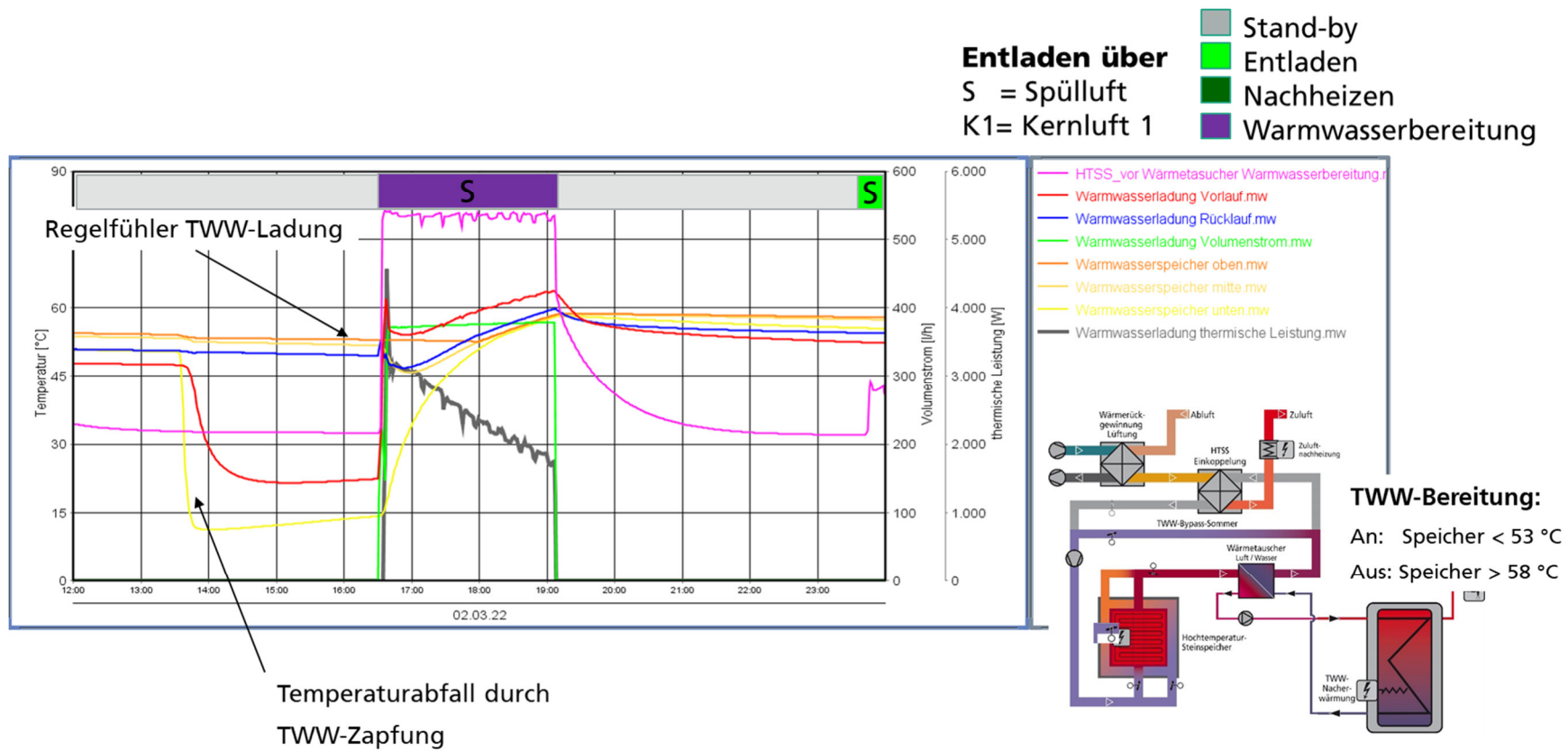
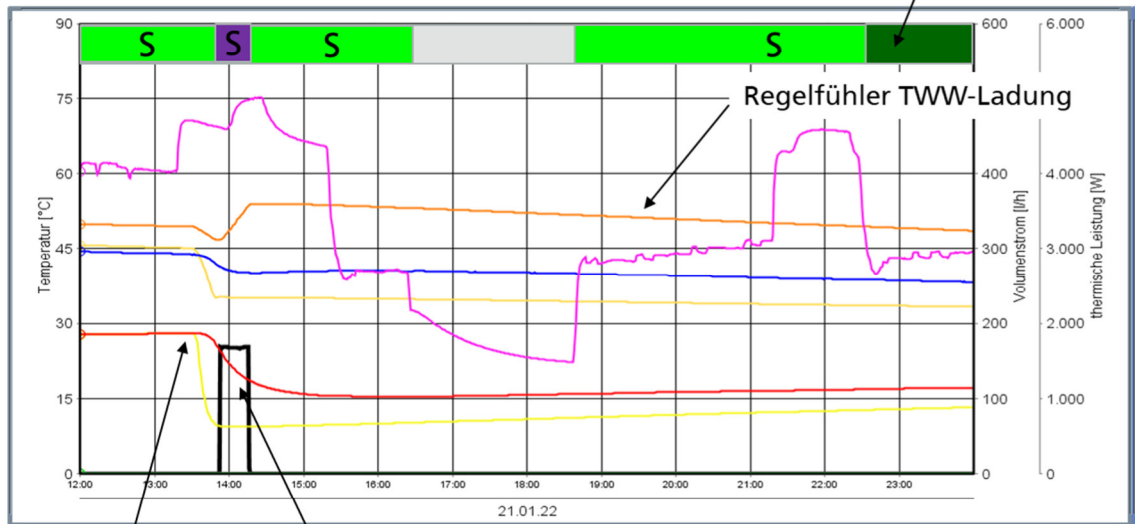


Bild 275:
 HTSS: TWW-Bereitung mit HTSS (Dauer: ca. 2,5-3,0h).

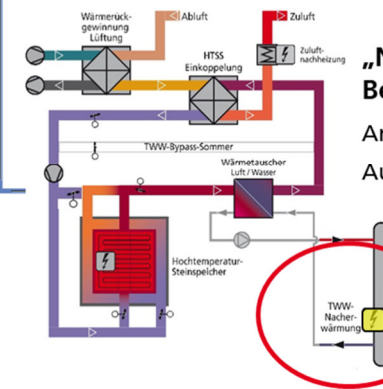
Heißlufttemperatur vor Luft/Wasser Wärmetauscher zu gering (HTSS unter 100°C)

HTSS-Ladegrad reicht nicht mehr um Solltemperatur Zuluft zu erreichen

- Stand-by
- Entladen
- Nachheizen
- Warmwasserbereitung



- HTSS_vor Wärmetauscher Warmwasserbereitung.j
- Warmwasserladung Vorlauf.mw
- Warmwasserladung Rücklauf.mw
- Warmwasserladung Volumenstrom.mw
- Warmwasserspeicher oben.mw
- Warmwasserspeicher mitte.mw
- Warmwasserspeicher unten.mw
- Warmwasserladung thermische Leistung.mw
- O5_HTSS_TWW_Heizstab_elP.mw



„Not“-TWW-Bereitung:
 An: Speicher < 47 °C
 Aus: Speicher > 52 °C

WW-Zapfung

„Not“-Heizstab

Bild 276:
 HTSS: TWW-Bereitung mittels „Not“-Heizstab.

A.2 Sachbilanzinventare der Windheizung 2.0-Komponenten (Ökobilanz)

A.2.1 Sachbilanzinventar des Hochtemperatur-Steinspeichers (HTSS)

In den nachfolgenden Tabelle 33 bis Tabelle 38 sind die Eingangsgrößen (Sachbilanzinventare) für die Modellbildung des Hochtemperatur-Steinspeichers (HTSS) im Rahmen der Ökobilanz dokumentiert.

Tabelle 33:
Inputgrößen für die Herstellung (Modul A1-A3) des Speicherkerns, je 1 Stück HTSS.

| Speicherkern – je 1 Stück HTSS | | | | | | | |
|--------------------------------|---|------------------|--------------------------------|-------|----------------|------------|--|
| Element | Material | Bezeichnung | Technische Daten | Menge | Einheit | Masse | Verwendeter Datensatz [18] |
| Schamottstein | Schamott: -40 % Aluminiumoxid -50 % Siliciumoxid -2,1 % Eisenoxid -7,9 % sonstige | Suprath A40t | Dichte: 2250 kg/m ³ | 1,34 | m ³ | 2934,58 kg | -Aluminium oxide (alumina) - Ferrous oxide (FeO) - Silica Sand (flour) |
| Mörtel | Schamott-Mörtel: -38 % Aluminiumoxid -55 % Siliciumoxid -2,3 % Eisenoxid -4,7 % sonstige | Carathin C40 | Dichte: 1700 kg/m ³ | 0,15 | m ³ | 250 kg | -Aluminium oxide (alumina) - Ferrous oxide (FeO) - Silica Sand (flour) |
| Beton | Leichtbeton: -46 % Aluminiumoxid -36 % Siliciumoxid -12 % Calciumoxid -2,5 % Eisenoxid -3,5 % sonstige | Carath FL 1401 | Dichte: 1470 kg/m ³ | 0,14 | m ³ | 211,68 kg | -Aluminium oxide (alumina) - Silica Sand (flour) -Calcium oxide - Ferrous oxide (FeO) |
| Feuerleichtstein | Aluminiumsilikat: -38 % Aluminiumoxid -55 % Siliciumoxid -2,2 % Eisenoxid -4,8 %sonstige | Porrath FL 25-08 | Dichte: 800 kg/m ³ | 0,035 | m ³ | 27,65 kg | -Aluminium oxide - Silica Sand (flour) - Ferrous oxide (FeO) |

| | | | | | | | |
|--------|---|------------------|---|-------|----------------|----------|--|
| | Aluminiumsilikat: -37 % Aluminiumoxid -56 % Siliciumoxid -1,9 % Eisenoxid -5,1 % sonstige | Porrath FL 24-06 | | 0,114 | m ³ | 91,09 kg | -Aluminium oxide - Silica Sand (flour) - Ferrous oxide (FeO) |
| Kleber | Mullit: -68 % Aluminiumoxid -30 % Siliciumoxid -0,3 % Eisenoxid -0,3 % Natriumoxid -1,4 % sonstige | Porrathin 30 | Materialbedarf:4,5 kg/m ² | 10 | m ² | 45 kg | -Aluminium oxide -Silica Sand (flour) -Ferrous oxide (FeO) - Natriumoxid: Abschätzung aus Natriumnitrat und Natriumhyd- roxid im Verhältnis 1:1 |
| | Aluminiumsilikat: -43 %Aluminiumoxid -49 % Siliciumoxid -6 % Kaliumoxid -1 % Eisenoxid -1 % sonstige | Porrathin HT | Materialbedarf: 3,5kg/m ² | 12,86 | m ² | 45 kg | -Aluminium oxide -Ferrous oxide (FeO) -Silica Sand (flour) - Kaliumoxid: Abschätzung über Natriumoxid |

Tabelle 34:
Inputgrößen für die Herstellung (Modul A1-A3) der Dämmstoffe, je 1 Stück HTSS.

| Gehäuse – je 1 Stück HTSS | | | | | | | |
|---------------------------|---|------------------------|--|--------|----------------|-----------|--|
| Produkt | Material | Bezeichnung | Technische Daten | Menge | Einheit | Masse | Verwendeter Datensatz [18] |
| Dämmplatte | Vermiculite: -50 % Siliciumoxid -23 % Kaliumoxid -11 % Aluminiumoxid -10 % Magnesiumoxid -4 % Eisenoxid -2 % sonstige | Thermax S500 | Dichte: 450 kg/m ³ Dicke: 20mm | 0,24 | m ³ | 109,8 kg | - Silica sand (flour) - Ferrous oxide (FeO) - Aluminium oxide - Abschätzung von Kaliumoxid: über Natriumoxid - Abschätzung von Magnesiumoxid über: Oxygen (gaseous) ts, Magnesium ts |
| Calciumsili- katplatte | Calciumsilikat: -46 % Siliciumoxid -37 % Calciumoxid -0,2 % Eisenoxid -16,8 % sonstige | Microcal 1100 | Dichte: 250 kg/m ³ Dicke: 40mm | 0,075 | m ³ | 18,75 kg | -Silica Sand (flour) -Lime (CaO) quicklime lumpy |
| | | | Dicke: 30mm | 0,3375 | m ³ | 84,375 kg | -Ferrous oxide (FeO) |
| Mikropo- röse Platte | Silikate: -80 % Siliciumoxid -15 % Siliciumcarbid -5 % sonstige | WDS Ultra | Dichte: 300 kg/m ³ Dicke: 40mm | 0,6776 | m ³ | 203,28 | - Silica sand (flour) - Abschätzung von Siliciumcarbid über: Silica Sand (flour) ts, Coke mix tx, Electricity grid mix 1kV-60kV ts |
| Dämmvlies | Glaswolle | Multitherm Mth 550 | Dichte: 120 kg/m ³ Dicke: 10mm & 30mm | 0,8648 | m ³ | 103,78 kg | - Glass wool |
| | Alugitterfolie | | Dichte: 2698 kg/m ³ Dicke: 0,5mm | 0,0025 | m ³ | 4,22 kg | - Aluminium foil |
| Fasermatte | Aluminiumsilikat: -52 % Siliciumoxid -48 % Aluminiumoxid | Alsitra Mat 1300 | Dichte: 128 kg/m ³ Dicke: 6,4mm | 0,0857 | m ³ | 10,97 kg | - Silica Sand (flour) - Aluminium oxide (alumina) |
| Faserwolle | Kalcium/Magnesiumsilikat: -80 % Siliciumoxid -20 % Calciumoxid | Calsitra (Mat) 1250 | Dichte: 128 kg/m ³ Dicke: 12,7mm & 25,4mm | | | 63,52 kg | - Silica sand (flour) - Lime (CaO) quicklime lumpy |
| Dämmung Deckel | Erdalkalisilikatwolle: -76 % Siliciumoxid) | EVAC EVS 134 | Dichte: 300 kg/m ³ Dicke: 40mm | 0,1 | m ³ | 30 kg | - Silica sand (flour) - Lime (CaO) quicklime lumpy |

| | | | | | | | |
|------------------------------------|--|---------------------|---|------|----------------|----------|---|
| | -22 % Calciumoxid -2 % Aluminiumoxid -2 % sonstige | | | | | | - Aluminium oxide alumina |
| | Erdalkalisilikatwolle: -83 % Siliciumoxid -15 % Calciumoxid -2 % Aluminiumoxid | EVAC EVS 135 | Dichte: 400kg/m ³ Φ:110mm | | | 3,59 kg | - Silica Sand (flour) - Lime (CaO) quicklime lumpy - Aluminium oxide alumina |
| Faserpapier | Erdalkalisilikatwolle: -80 % Siliciumoxid -10 % Calciumoxid -10 % Magnesiumoxid | Calsitra CP 1250 | Dichte: 220 kg/m ³ Dicke: 2mm | 0,04 | m ³ | 8,8 kg | - Silica sand (flour) - Lime (CaO) quicklime lumpy - Abschätzung Magnesiumoxid über: Oxygen (gaseous) ts, Magnesium ts |
| Keramikrohr für Elektro- nik | Keramik: -SiSiC | C130 | Dichte: 2500kg/m ³ Φ:54mm Länge: 200mm | 0,01 | m ³ | 25,18 kg | - Abschätzung von Siliciumcarbid über: Si- lica Sand (flour) ts, Coke mix tx, Electricity grid mix 1kV-60kV ts |

Tabelle 35:
Inputgrößen für die Herstellung (Modul A1-A3) des Gehäuses, je 1 Stück HTSS.

| Gehäuse – je 1 Stück HTSS | | | | | | | |
|--------------------------------|-------------------------------|--------------------------|--|-------|---------|----------|---|
| Produkt | Material | Bezeichnung | Technische Daten | Menge | Einheit | Masse | Verwendeter Datensatz [18] |
| Boden/Wand/Decken- elemente | ST37 | Baustahl | Dichte: 7900kg/m ³ Dicke: 30mm-141mm | 25 | St | 774,4 kg | Steel sheet (EN15804 A1-A3) |
| Schrauben | ST37 | Baustahl | Dichte: 7900kg/m ³ M10-M20 | 165 | St | 11,95 kg | Fixing material screws stainless steel |
| Muttern | ST37 | Baustahl | Dichte:7900kg/m ³ | 260 | St | 67,6 kg | Fixing material screws stainless steel |
| Scheiben | ST37 | Baustahl | Dichte: 7900kg/m ³ | 350 | St | 88,4 kg | Fixing material screws stainless steel |
| Gewindeblech | Wst 1.4841 | Flachstahl | Dichte: 7900 kg/m ³ Dicke: 3mm | 990 | St | 59,4 kg | Steel sheet (EN15804 A1-A3) |
| Gewindestift | Wst 1.4841 | Stahl | Dichte: 7900 kg/m ³ | 465 | St | 12,25 kg | Steel sheet (EN15804 A1-A3) |
| Blechstreifen | ST37 | Baustahl | Dichte: 7900 kg/m ³ Dicke: 0,5mm | 54 | St | 8,35 kg | Steel sheet (EN15804 A1-A3) |
| Elektrode (Schweiß- naht) | | Böhler Fox A7- AD=3,5 | Dicke: 3,5mm | 260 | St | 6,5 kg | -Steel wire -Electricity grid mix |
| Brandschutzbauplatte | Keramik | Cordierit 1300-11 | Dichte: 2000 kg/m ³ Dicke: 20mm | 7 | St | 84 kg | Glass ceramic production |
| | Zementgebun- denes Silikat | Promatect H | Dichte: 870 kg/m ³ Dicke: 10mm | 20 | St | 3,92 kg | Gypsum plaster board (Fire protec- tion) |
| Silikon | | Black Seal | | 8 | St | 2,64 kg | Silicone resin plaster CdL (A1-A3) |
| Montageclip | Wst 1.0037 | Flachstahl | Dichte: 7900 kg/m ³ | 550 | St | 0,55 kg | Steel sheet (EN15804 A1-A3) |

Tabelle 36:
Inputgrößen für die Herstellung (Modul A1-A3) der Heizelemente, je 1 Stück HTSS.

| Heizelemente – je 1 Stück HTSS | | | | | | | |
|--------------------------------|--|-------------|---|-------|---------|----------|---|
| Produkt | Material | Bezeichnung | Technische Daten | Menge | Einheit | Masse | Verwendeter Datensatz [18] |
| Heizwendel | 1.4766 (CrAl20-5) 75 % Eisen -20 % Chrom -5 % Aluminium | CrAl20-5 | 800x3,5x2.2mm a 4000 W Spezifisches Gewicht: 0,624 kg/Stk | 18 | St | 11,23 kg | -iron and steel production -Ferro chrome - Primary aluminium production |
| Keramikrohr | SiSiC | | Spezifisches Gewicht: 0,946 kg/Stk | 18 | St | 17,97 kg | - Abschätzung von Siliciumcarbid: Silica Sand (flour) ts, Coke mix tx, Electricity grid mix 1kV-60kV ts |
| Keramikhülse | SiSiC | | Spezifisches Gewicht: 1,1 kg/Stk | 18 | St | 19,8 kg | - Abschätzung von Siliciumcarbid: Silica Sand (flour) ts, Coke mix tx, Electricity grid mix 1kV-60kV ts |

Tabelle 37:
Inputgrößen für die Herstellung (Modul A1-A3) des Externen Equipments, je 1 Stück HTSS.

| Externes Equipment – je 1 Stück HT | | | | | | | |
|------------------------------------|--|---------------------|--|-----------|----------------|----------------|---|
| Produkt | Material | Bezeichnung | Technische Daten | Menge | Einheit | Masse pro HTSS | Verwendeter Datensatz [18] |
| Wärmetauscher | Metall | ATEC | 1,7 kW & 3,1 kW | Jeweils 1 | Stk | 4,8 kg | Abschätzung über: |
| Schaltschrank | | Leistungselektronik | Flächengewicht: 1,33 kg/m ² | 1 | m ² | 1,33 kg | Abschätzung über: |
| | Aluminium | Aluminium-Gehäuse | 1m x 1m x 0,3m | 1 | Stk | 4,32 kg | Aluminium sheet (EN15804 A1-A3) |
| Thermoelement | NiCr-Ni: -48 % Nickelchrom -40 % Polytetrafluoroethylen -12 % Stahl | | Spezifisches Gewicht: 0,0489 kg/Stk | 23 | Stk | 1,125 kg | - Polytetrafluoroethylen - Stainless steel sheet (EN15804 A1-A3) - Abschätzung von Nickelchrom: Nickel mix ts, Ferro chrome mix ts |

Tabelle 38:
Inputgrößen für das Lebensende (Modul C) und Gutschriften außerhalb der Systemgrenze (Modul D) je 1 Stück HTSS

| Produkt | Szenario am Lebensende | Verwendeter Datensatz (Modul C) [18] | Masse | Annahme Verlustrate | | Anrechnung für Gutschrift (Modul D) | | Verwendeter Datensatz (Modul D) [18] |
|----------------------------|------------------------|---|------------|---------------------|-----------|-------------------------------------|-----------|--|
| | | | | | | | | |
| Schamottstein | Bauschutttaufbereitung | Construction waste processing (EN15804 C3) | 2934,58 kg | 0 % | | 97 % | 2846,5 kg | Gravel (Grain Size 2/32) (EN15804 A1-A3) |
| Beton | Bauschutttaufbereitung | Construction waste processing (EN15804 C3) | 211,68 kg | 0 % | | 97 % | 205,33 kg | Gravel (Grain Size 2/32) (EN15804 A1-A3) |
| Feuerleichtstein | Bauschutttaufbereitung | Construction waste processing (EN15804 C3) | 118,74 | 0 % | | 97 % | 115,18 kg | Gravel (Grain Size 2/32) (EN15804 A1-A3) |
| Mörtel | Bauschutttaufbereitung | Construction waste processing (EN15804 C3) | 250 kg | 0 % | | 97 % | 242,5 kg | Gravel (Grain Size 2/32) (EN15804 A1-A3) |
| Kleber | Bauschutttaufbereitung | Construction waste processing (EN15804 C3) | 90 kg | 0 % | | 97 % | 87,3 kg | Gravel (Grain Size 2/32) (EN15804 A1-A3) |
| Dämmplatte | Deponie | Inert matter (Construction waste) on landfill | 109,8 kg | 5 % | 104,31 kg | | | |
| Calciumsilikatplatte | Deponie | Inert matter (Construction waste) on landfill | 109,13 kg | 5 % | 103,67 kg | | | |
| Mikroporöse Platte | Deponie | Inert matter (Construction waste) on landfill | 203,28 kg | 5 % | 193,12 kg | | | |
| Dämmvlies (ohne Aluqitter) | Deponie | Inert matter (Construction waste) on landfill | 103,78 kg | 5 % | 98,6 kg | | | |
| Fasermatte | Deponie | Inert matter (Construction waste) on landfill | 10,97 kg | 5 % | 10,42 kg | | | |
| Faserwolle | Deponie | Inert matter (Construction waste) on landfill | 63,56 kg | 5 % | 60,4 kg | | | |
| Dämmung Deckel | Deponie | Inert matter (Construction waste) on landfill | 33,59 kg | 5 % | 31,91 kg | | | |
| Faserpapier | Deponie | Inert matter (Construction waste) on landfill | 8,8 kg | 5 % | 8,36 kg | | | |
| Brandschutzbauplatte | Deponie | Inert matter (Construction waste) on landfill | 87,92 kg | 5 % | 83,5 kg | | | |
| Silikon | Deponie | Inert matter (Construction waste) on landfill | 2,64 kg | 5 % | 2,51 kg | | | |

| | | | | | | | | |
|----------------------------|-------------------------|--|----------|-----|----------|------|---|--|
| Keramikrohr für Elektronik | Deponie | Inert matter (Construction waste) on landfill | 25,18 kg | 5 % | 23,9 kg | | | |
| Keramikrohr | Deponie | Inert matter (Construction waste) on landfill | 17,97 kg | 5 % | 17,1 kg | | | |
| Keramikhülse | Deponie | Inert matter (Construction waste) on landfill | 19,8 kg | 5 % | 18,81 kg | | | |
| Schrauben | Stoffliche Verwertung | Recycling potential stainless steel sheet (EN15804 C4) | 11,95 kg | | | 95 % | 11,35 kg | Recycling potential stainless steel sheet (EN15804 D) |
| Muttern | Stoffliche Verwertung | Recycling potential stainless steel sheet (EN15804 C4) | 67,6 kg | | | 95 % | 64,22 kg | Recycling potential stainless steel sheet (EN15804 D) |
| Scheiben | Stoffliche Verwertung | Recycling potential stainless steel sheet (EN15804 C4) | 88,4 kg | | | 95 % | 83,98 kg | Recycling potential stainless steel sheet (EN15804 D) |
| Gehäuse | Stoffliche Verwertung | Recycling potential steelt sheet galvanised (EN15804 C4) | 774,4 kg | | | 95 % | 735,68 kg | Recycling potential steel sheet galvanised (EN15804 D) |
| Gewindeblech/Gewindestift | Stoffliche Verwertung | Recycling potential steelt sheet galvanised (EN15804 C4) | 71,65 kg | | | 95 % | 68,1 kg | Recycling potential steel sheet galvanised (EN15804 D) |
| Blechstreifen | Stoffliche Verwertung | Recycling potential steelt sheet galvanised (EN15804 C4) | 8,35 kg | | | 95 % | 7,93 kg | Recycling potential steel sheet galvanised (EN15804 D) |
| Montageclip | Stoffliche Verwertung | Recycling potential steelt sheet galvanised (EN15804 C4) | 0,55 kg | | | 95 % | 0,52 kg | Recycling potential steel sheet galvanised (EN15804 D) |
| Wärmetauscher | Stoffliche Verwertung | Modul C Plattenwärmetauscher | 0,37 St | | | | | Modul D Plattenwärmetauscher |
| Leistungselektronik | Energetische Verwertung | Populated printed wiring board (before RoHS) in waste incineration plant | 1,33 kg | 5 % | 1,26 kg | | 1,65 MJ electricity 3,85 MJ thermal energy | GLO Electricity credit GLO Energy credit |
| Schaltschrankgehäuse | Stoffliche Verwertung | Recycling potential aluminium sheet | 4,32 kg | 5 % | 4,1 kg | | | |

A.2.2 Sachbilanzinventar der Bauteilaktivierung (BTA) Decke, Neubau

In den nachfolgenden Tabelle 39 bis Tabelle 42 sind die Eingangsgrößen (Sachbilanzinventare) für die Modellbildung der Bauteilaktivierung im Neubau für die Decke im Rahmen der Ökobilanz dokumentiert.

Tabelle 39:

Inputgrößen für die Herstellung (Modul A1-A3) für das Bauteil Decke im Neubau mit Bauteilaktivierung (BTA-Decke-neu), je 1 m² Deckenfläche.

| Produkt bzw. Bauteilschicht | Material | Technische Daten | Menge | Einheit | Flächengewicht [kg/m ²] | Verwendeter Datensatz [18] |
|--------------------------------------|---|--|-------|--------------------------------|-------------------------------------|---|
| Beton | Beton C25/30 | Dicke = 26 cm Dichte = 2300 kg/m ³ | 0,26 | m ³ /m ² | 598 | Concrete C30/37 (Ready-mix-concrete) |
| Dämmung XPS-WLG036 | Extrudiertes Polystyrol (XPS) | Dicke = 10 cm Dichte = 32 kg/m ³ | 0,1 | m ³ /m ² | 3,2 | Extruded polystyrene (XPS) |
| Heiz-Kühlrohr (Aluminiumverbundrohr) | Physikalisch vernetztes Polyethylen (PEX), aluminiumverstärkt | ϕ 16 mm Wandstärke = 2 mm Längengewicht = 0,102 kg/lfm | 11,82 | lfm/m ² | 1,206 | PEXc-Al-PEXc-pipe production (16 x 2mm) |
| Bewehrung (E12 6/6/10) | Baustahl BSt500 | | 20,88 | kg/m ² | 20,88 | Reinforced steel (wire) (EN 15804 A1-A3); Value of scrap [39] |
| Estrich | Zementestrich | Dicke = 6 cm Dichte = 2000 kg/m ³ | 0,06 | m ³ /m ² | 120 | Floor screed (cement) |

Tabelle 40:

Inputgrößen für das Lebensende (Modul C) und Gutschriften außerhalb der Systemgrenze (Modul D) für das Bauteil Decke im Neubau mit Bauteilaktivierung (BTA-Decke-neu), je 1 m² Deckenfläche.

| Produkt bzw. Bauteilschicht | Szenario am Lebensende | Verwendeter Datensatz (Modul C) [18] | Annahme Verlustrate | Flächengewicht [kg/m ²] | Anrechnung für Gutschrift (Modul D) | | Verwendeter Datensatz (Modul D) [18] |
|--------------------------------------|------------------------|--|---------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|--------|--|
| | | | | | | | |
| Beton | Bauschutttaufbereitung | Construction waste processing | 0 % | 598 | 97 % | 580,06 | Gravel (Grain size 2/32 EN15804 A1-A3) |
| Dämmung XPS-WLG036 | Thermische Verwertung | Municipal waste incineration, including credits ts | 0 % | 3,2 | 90 % | 2,88 | Municipal waste incineration, including credits ts |
| Heiz-Kühlrohr (Aluminiumverbundrohr) | Stoffliche Verwertung | PEX aluminium pipe (EN15804 C3-C4) | 0 % | 1,206 | 90 % | 1,09 | PEX aluminium pipe (EN15804 D) |
| Bewehrung (E12 6/6/10) | Stoffliche Verwertung | Credit for recycling of steel scrap | 0 % | 20,88 | 100 % | 20,88 | Value of scrap [39] |
| Estrich | Bauschutttaufbereitung | Construction waste processing | 0 % | 120 | 97 % | 116,26 | Gravel (Grain size 2/32 EN15804 A1-A3) |

Tabelle 41:

Inputgrößen für die Herstellung (Modul A1-A3) für das Bauteil Decke im Neubau – nur konstruktiver Mehraufwand für Bauteilaktivierung (BTA-Decke-neu-Delta), je 1 m² Deckenfläche.

| Produkt bzw. Bauteilschicht | Material | Technische Daten | Menge | Einheit | Flächengewicht [kg/m ²] | Verwendeter Datensatz [18] |
|--------------------------------------|---|--|-------|--------------------------------|-------------------------------------|---|
| Beton | Beton C25/30 | Dicke = 6 cm Dichte = 2300 kg/m ³ | 0,06 | m ³ /m ² | 138 | Concrete C30/37 (Ready-mix-concrete) |
| Dämmung XPS-WLG036 | Extrudiertes Polystyrol (XPS) | Dicke = 4 cm Dichte = 32 kg/m ³ | 0,04 | m ³ /m ² | 1,28 | Extruded polystyrene (XPS) |
| Heiz-Kühlrohr (Aluminiumverbundrohr) | Physikalisch vernetztes Polyethylen (PEX), aluminiumverstärkt | ϕ 16 mm Wandstärke = 2 mm Längengewicht = 0,102 kg/lfm | 11,82 | lfm/m ² | 1,206 | PEXc-Al-PEXc-pipe production (16 x 2mm) |
| Bewehrung (E12 6/6/10) | Baustahl BSt500 | | 3,261 | kg/m ² | 3,261 | Reinforced steel (wire) (EN 15804 A1-A3); Value of scrap [39] |

Tabelle 42:

Inputgrößen für das Lebensende (Modul C) und Gutschriften außerhalb der Systemgrenze (Modul D) für das Bauteil Decke im Neubau - nur konstruktiver Mehraufwand für Bauteilaktivierung (BTA-Decke-neu-Delta), je 1 m² Deckenfläche.

| Produkt bzw. Bauteilschicht | Szenario am Lebensende | Verwendeter Datensatz (Modul C) [18] | Flächengewicht [kg/m ²] | Anrechnung für Gutschrift (Modul D) | | Verwendeter Datensatz (Modul D) [18] |
|--------------------------------------|------------------------|---|-------------------------------------|-------------------------------------|--------|---|
| Beton | Bauschuttzubereitung | Construction waste processing | 138 | 97 % | 133,86 | Gravel (Grain size 2/32 EN15804 A1-A3) |
| Dämmung XPS-WLG036 | Thermische Verwertung | Municipal waste incineration, including credits | 1,28 | 90 % | 1,15 | Municipal waste incineration, including credits |
| Heiz-Kühlrohr (Aluminiumverbundrohr) | Stoffliche Verwertung | PEX aluminium pipe (EN15804 C3-C4) | 1,206 | 90 % | 1,09 | PEX aluminium pipe (EN15804 D) |
| Bewehrung (E12 6/6/10) | Stoffliche Verwertung | Credit for recycling of steel scrap | 3,261 | 100 % | 3,261 | Value of scrap [39] |

A.2.3 Sachbilanzinventar der Bauteilaktivierung (BTA) Wand, Neubau

In den nachfolgenden Tabelle 43 bis Tabelle 46 sind die Eingangsgrößen (Sachbilanzinventare) für die Modellbildung der Bauteilaktivierung im Neubau für die Wand im Rahmen der Ökobilanz dokumentiert.

Tabelle 43:

Inputgrößen für die Herstellung (Modul A1-A3) für das Bauteil Wand im Neubau mit Bauteilaktivierung (BTA-Wand-neu), je 1 m² Wandfläche

| Produkt bzw. Bauteilschicht | Material | Technische Daten | Menge | Einheit | Flächengewicht [kg/m ²] | Verwendeter Datensatz [18] |
|-----------------------------|---|--|-------|--------------------------------|-------------------------------------|--|
| Kalksandstein | Kalksandstein | Dicke = 24 cm Dichte = 2000 kg/m ³ | 0,24 | m ³ /m ² | 480 | Sand-lime-brick (EN15804 A1-A3) |
| Dämmung Calostat | Amorphes Siliciumdioxid: -10 M.-% Kieselsäureanhydrid -70 M.-% amorphe Kieselsäure -20 M.-% Siliciumcarbid | Dicke = 3 cm Dichte = 165 kg/m ³ | 0,06 | m ³ /m ² | 9,9 | -Silica sand (flour) ts - Abschätzung amorpher Kieselsäure: Silica Sand (flour) ts, Process water ts - Abschätzung von Siliciumcarbid: Silica Sand (flour) ts, Coke mix tx, Electricity grid mix 1kV-60kV ts |
| Heiz-/Kühlrohr (Entladung) | Physikalisch vernetztes Polyethylen (PEX), aluminiumverstärkt | φ 16 mm Wandstärke = 2 mm Längengewicht = 0,102 kg/lfm | 7,3 | lfm/m ² | 0,744 | PEXc-Al-PEXc-pipe production (16 x 2mm) |
| Heiz-/Kühlrohr (Beladung) | Physikalisch vernetztes Polyethylen (PEX), aluminiumverstärkt | φ 16,2 mm Wandstärke = 2,6 mm Längengewicht = 0,112 kg/lfm | 4 | lfm/m ² | 0,454 | PEXc-Al-PEXc-pipe production (16 x 2mm) |
| KlimaSan Profil | Aluminium: -100 M.-% Aluminiumplatte - 4 Meter Schweißnaht | 0,374 kg/lfm | 6,2 | lfm/m ² | 2,32 | -EU Aluminium sheet (EN15804 A1-A3) -GLO:Aluminium laser welding (1 to 3,5mm depth) |
| Gipskartonplatte | Gips | d=12,5 mm | 2 | Stk | 17 | Gypsum plaster board (Acoustic ceiling) |

| | | | | | | |
|--------------------------------------|--------|---|----|--------------------|-------|--|
| | | Flächengewicht (bei d=12,5 mm) =8,5 kg/(m ² *Stk) | | | | |
| Quellvergussmörtel | Mörtel | Dichte=1600 kg/m ³ | | | 13,51 | Normal mortar (A1-A3) |
| Befestigungsmaterial (Holzbalken) | Fichte | Dichte = 482 kg/m ³ Maße: 0,04 m x 0,06 m x 2,96 m | 4 | Stk | 1,85 | DE: Timber spruce (12 % moisture, 10,7 % H ₂ O content) |
| Befestigungsmaterial (Schrauben) | Stahl | 0,005 kg/Stk | 32 | Stk/m ² | 0,16 | Fixing material screws stainless steel; Value of scrap [39]; Steel, stainless 304, scrap |

Tabelle 44:
Inputgrößen für das Lebensende (Modul C) und Gutschriften außerhalb der Systemgrenze (Modul D) für das Bauteil Wand im
Neubau mit Bauteilaktivierung (BTA-Wand-neu), je 1 m² Wandfläche.

| Produkt bzw. Bauteilschicht | Szenario am Lebensende | Verwendeter Datensatz (Modul C) [18] | Flächengewicht [kg/m ²] | Anrechnung für Gutschrift (Modul D) | | Verwendeter Datensatz (Modul D) [18] |
|-----------------------------------|------------------------|--|-------------------------------------|-------------------------------------|-------|---|
| Kalksandstein | Bauschuttzubereitung | Construction waste processing | 480 | 97 % | 465,6 | Gravel (Grain size 2/32 EN15804 A1-A3) |
| Dämmung Calostat | Deponierung | Municipal waste landfill (EN15804 C4) | 9,9 | 95 % | 9,41 | |
| Heiz-/Kühlrohr (Entladung) | Stoffliche Verwertung | PEX aluminium pipe (EN15804 C3-C4) | 0,744 | 90 % | 0,67 | PEX aluminium pipe (EN15804 D) |
| Heiz-/Kühlrohr (Beladung) | Stoffliche Verwertung | PEX aluminium pipe (EN15804 C3-C4) | 0,454 | 90 % | 0,41 | PEX aluminium pipe (EN15804 D) |
| Quellvergussmörtel | Bauschuttzubereitung | Construction waste processing | 13,51 | 97 % | 13,1 | Gravel (Grain size 2/32 EN15804 A1-A3) |
| Gipskartonplatte | Deponierung | Municipal waste landfill (EN15804 C4) | 17 | 95 % | 16,15 | |
| KlimaSan Profil | Stoffliche Verwertung | | 2,32 | 95 % | 2,2 | Recycling potential aluminium sheet |
| Befestigungsmaterial (Holzbalken) | Thermische Verwertung | Processed wood in waste incineration | 1,85 | 95 % | 1,76 | -GLO:Electricity credit -GLO:Energy credit |
| Befestigungsmaterial (Schrauben) | Stoffliche Verwertung | GLO: Credit for recycling of stainless steel scrap | 0,16 | 100 % | 0,16 | Value of scrap [worldsteel 2019] |

Tabelle 45:

Inputgrößen für die Herstellung (Modul A1-A3) für das Bauteil Wand im Neu-bau – nur konstruktiver Mehraufwand für Bauteilaktivierung (BTA-Wand-neu-Delta), je 1 m² Wandfläche.

| Produkt bzw. Bauteilschicht | Material | Technische Daten | Menge | Einheit | Flächengewicht [kg/m ²] | Verwendeter Datensatz [18] |
|-----------------------------------|---|--|-------|--------------------------------|-------------------------------------|--|
| Dämmung Calostat | Amorphes Siliciumdioxid: -10 M.-% Kieselsäureanhydrid -70 M.-% amorphe Kieselsäure -20 M.-% Siliciumcarbid | Dicke = 3 cm Dichte = 165 kg/m ³ | 0,06 | m ³ /m ² | 9,9 | -Silica sand (flour) ts - Abschätzung amorpher Kieselsäure: Silica Sand (flour) ts, Process water ts - Abschätzung von Siliciumcarbid: Silica Sand (flour) ts, Coke mix tx, Electricity grid mix 1kV-60kV ts |
| Heiz-Kühlrohr (Entladung) | Physikalisch vernetztes Polyethylen (PEX), aluminiumverstärkt | φ 16 mm Wandstärke = 2 mm Längengewicht = 0,102 kg/lfm | 7,3 | lfm/m ² | 0,744 | PEXc-Al-PEXc-pipe production (16 x 2mm) |
| Heiz-Kühlrohr (Beladung) | Physikalisch vernetztes Polyethylen (PEX), aluminiumverstärkt | φ 16,2 mm Wandstärke = 2,6 mm Längengewicht = 0,112 kg/lfm | 4 | Lfm/m ² | 0,454 | PEXc-Al-PEXc-pipe production (16 x 2mm) |
| KlimaSan Profil | Aluminium: -100 M.-% Aluminiumplatte - 4 Meter Schweißnaht | 0,374 kg/lfm | 6,2 | lfm/m ² | 2,32 | -EU Aluminium sheet (EN15804 A1-A3) -GLO:Aluminium laser welding (1 to 3,5mm depth) |
| Befestigungsmaterial (Holzbalken) | Fichte | Dichte = 482 kg/m ³ Maße: 0,04 m x 0,06 m x 2,96 m | 4 | Stk | 1,85 | DE: Timber spruce (12 % moisture, 10,7 % H ₂ O content) |
| Befestigungsmaterial (Schrauben) | Stahl | 0,005 kg/Stk | 32 | Stk | 0,16 | DE: Fixing material screws stainless steel; Value of scrap [39]; Steel; stainless 304, scrap |

Tabelle 46:

Inputgrößen für das Lebensende (Modul C) und Gutschriften außerhalb der Systemgrenze (Modul D) für das Bauteil Wand im Neubau - nur konstruktiver Mehraufwand für Bauteilaktivierung (BTA-Wand-neu-Delta) , je 1 m² Wandfläche.

| Produkt bzw. Bauteilschicht | Szenario am Lebensende | Verwendeter Datensatz (Modul C) [18] | Flächengewicht [kg/m ²] | Anrechnung für Gutschrift (Modul D) | | Verwendeter Datensatz (Modul D) [18] |
|-----------------------------------|------------------------|--|-------------------------------------|-------------------------------------|------|---|
| Dämmung Calostat | Deponierung | Municipal waste landfill (EN15804 C4) | 9,9 | 95 % | 9,41 | |
| Heiz-Kühlrohr | Stoffliche Verwertung | PEX aluminium pipe (EN15804 C3-C4) | 0,744 | 90 % | 0,67 | PEX aluminium pipe (EN15804 D) |
| Heiz-/Kühlrohr | Stoffliche Verwertung | PEX aluminium pipe (EN15804 C3-C4) | 0,454 | 90 % | 0,41 | PEX aluminium pipe (EN15804 D) |
| KlimaSan Profil | Stoffliche Verwertung | Recycling potential aluminium sheet | 2,32 | 95 % | 2,2 | Recycling potential aluminium sheet |
| Befestigungsmaterial (Holzbalken) | Thermische Verwertung | Processed wood in waste incineration | 1,85 | 95 % | 1,76 | -GLO:Electricity credit -GLO:Energy credit |
| Befestigungsmaterial (Schrauben) | Stoffliche Verwertung | GLO: Credit for recycling of stainless steel scrap | 0,16 | 100 % | 0,16 | Value of scrap [39]; Steel |

A.2.4 Sachbilanzinventar der Bauteilaktivierung (BTA) Decke, Sanierung

In den nachfolgenden Tabelle 47 bis Tabelle 48 sind die Eingangsgrößen (Sachbilanzinventare) für die Modellbildung der Bauteilaktivierung in der Sanierung für die Decke im Rahmen der Ökobilanz dokumentiert.

Tabelle 47:

Inputgrößen für die Herstellung (Modul A1-A3) für das Bauteil Decke in der Sanierung mit Bauteilaktivierung (BTA-Decke-san), je 1 m² Deckenfläche.

| Produkt bzw. Bauteilschicht | Material | Technische Daten | Menge | Einheit | Flächengewicht [kg/m ²] | Verwendeter Datensatz [18] |
|-----------------------------|---|--|-------|--------------------------------|-------------------------------------|---|
| Dämmung Calostat | Amorphes Siliciumdioxid: -10 M.-% Kieselsäureanhydrid -70 M.-% amorphe Kieselsäure -20 M.-% Siliciumcarbid | Dicke = 4 cm Dichte = 165 kg/m ³ | 0,04 | m ³ /m ² | 6,6 | -Silica sand (flour) ts - Abschätzung amorpher Kieselsäure: Silica Sand (flour) ts, Process water ts, - Abschätzung von Siliciumcarbid: Silica Sand (flour) ts, Coke mix tx, Electricity grid mix 1kV-60kV ts |
| Heiz-Kühlrohr | Physikalisch vernetztes Polyethylen (PEX) | φ 16 mm Wandstärke = 2 mm Längengewicht = 0,095 kg/lfm | 8,88 | lfm/m ² | 0,1045 | Drinking water pipe PE-X |
| Beladeprofil | Aluminium: -37,5 M.-% Aluminium Extrusion -62,5 M.-% Aluminiumplatte -4 Meter Schweißnaht | Längengewicht = 1,625 kg/lfm Profil | 2,5 | lfm Profil /m ² | 4,06 | -EU Aluminium extrusion profile ts -EU Aluminium sheet (EN15804 A1-A3) -GLO:Aluminium laser welding (1 to 3,5mm depth) |
| Entladeprofil | Aluminium: -34,5 M.-% Aluminium Extrusion -65,5 M.-% Aluminiumplatte -4 Meter Schweißnaht | Längengewicht = 1,727 kg/lfm Profil | 1,39 | lfm Profil/m ² | 2,4 | -EU Aluminium extrusion profile ts -EU Aluminium sheet (EN15804 A1-A3) |
| Abstandhalter | Aluminium | 0,00678 kg/Stk | 4 | Stk/m ² | 0,027 | Aluminiumprofile (EN15804) |
| Flex Fliesenkleber | Mörtel | Dichte=1700 kg/m ³ | 3 | mm/m ² | 5,1 | Tile adhesive |

Tabelle 48:

Inputgrößen für das Lebensende (Modul C) und Gutschriften außerhalb der Systemgrenze (Modul D) für das Bauteil Decke in der Sanierung mit Bauteilaktivierung (BTA-Decke-san), je 1 m² Deckenfläche.

| Produkt bzw. Bauteilschicht | Szenario am Lebensende | Verwendeter Datensatz (Modul C) [18] | Flächengewicht [kg/m ²] | Anrechnung für Gutschrift (Modul D) [kg/m ²] | | Verwendeter Datensatz (Modul D) [18] |
|-----------------------------|------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------|--|-------|--|
| | | | | | | |
| Dämmung Calostat | Deponierung | Municipal waste landfill (EN15804 C4) | 6,6 | 95 % | 6,27 | |
| Heiz-Kühlrohr | Stoffliche Verwertung | PEX pipe (EN15804 C3-C4) | 0,1045 | 90 % | 0,094 | PEX pipe (EN15804 D) |
| Flex Fliesenkleber | Bauschuttzubereitung | Construction waste processing | 5,1 | 97 % | 4,95 | Gravel (Grain size 2/32 EN15804 A1-A3) |
| Beladeprofil | Stoffliche Verwertung | Recycling potential aluminium sheet | 4,06 | 95 % | 3,86 | Recycling potential aluminium sheet |
| Entladeprofil | Stoffliche Verwertung | Recycling potential aluminium sheet | 2,4 | 95 % | 2,28 | Recycling potential aluminium sheet |
| Abstandhalter | Stoffliche Verwertung | Recycling potential aluminium sheet | 0,027 | 95 % | 0,026 | Recycling potential aluminium sheet |

A.2.5 Sachbilanzinventar der Bauteilaktivierung (BTA) Wand, Sanierung

In den nachfolgenden Tabelle 49 bis Tabelle 50 sind die Eingangsgrößen (Sachbilanzinventare) für die Modellbildung der Bauteilaktivierung in der Sanierung für die Wand im Rahmen der Ökobilanz dokumentiert.

Tabelle 49:

Inputgrößen für die Herstellung (Modul A1-A3) für das Bauteil Wand in der Sanierung mit Bauteilaktivierung (BTA-Wand-san), je 1 m² Wandfläche.

| Produkt bzw. Bauteilschicht | Material | Technische Daten | Menge | Einheit | Flächengewicht [kg/m ²] | Verwendeter Datensatz [18] |
|---|---|--|-------|--------------------------------|-------------------------------------|--|
| Dämmung (Hochleistungsdämmmaterial) Calostat | Amorphes Siliciumdioxid: -10 M.-% Kieselsäureanhydrid -70 M.-% amorphe Kieselsäure -20 M.-% Siliciumcarbid | Dicke = 3 cm Dichte = 165 kg/m ³ | 0,06 | m ³ /m ² | 9,9 | -Silica sand (flour) ts - Abschätzung amorpher Kieselsäure: Silica Sand (flour) ts, Process water ts - Abschätzung von Siliciumcarbid: Silica Sand (flour) ts, Coke mix tx, Electricity grid mix 1kV-60kV ts |
| Heiz-Kühlrohr | Physikalisch vernetztes Polyethylen (PEX) | φ 16 mm Wandstärke = 2 mm Längengewicht = 0,095 kg/lfm | 0,7 | lfm/m ² | 0,067 | Drinking water pipe PE-X |
| Heiz-Kühlrohr (Aluminiumverbundrohr) | Physikalisch vernetztes Polyethylen (PEX), aluminiumverstärkt | φ 16 mm Wandstärke = 2 mm Längengewicht = 0,102 kg/lfm | 7,367 | lfm/m ² | 0,751 | PEXc-Al-PEXc-pipe production (16 x 2mm) |
| Beladeprofil | Aluminium: -37,5 M.-% Aluminium Extrusion -62,5 M.-% Aluminiumplatte -4 Meter Schweißnaht | Längengewicht = 1,625 kg/m Profil | 2,29 | m Profil /m ² | 3,72 | -EU Aluminium extrusion profile ts -EU Aluminium sheet (EN15804 A1-A3) -GLO:Aluminium laser welding (1 to 3,5mm depth) |
| KlimaSan Profil | Aluminium: -100 M.-% Aluminiumplatte - 4 Meter Schweißnaht | 0,374 kg/m Profil | 6,67 | m Profil/m ² | 2,49 | -EU Aluminium sheet (EN15804 A1-A3) -GLO:Aluminium laser welding (1 to 3,5mm depth) |

| | | | | | | |
|------------------|------|---|---|-----|----|---------------|
| Gipskartonplatte | Gips | d=12,5 mm Flächengewicht (bei d=12,5 mm) =8,5 kg/(m ² *Stk) | 2 | Stk | 17 | Tile adhesive |
|------------------|------|---|---|-----|----|---------------|

Tabelle 50:

Inputgrößen für das Lebensende (Modul C) und Gutschriften außerhalb der Systemgrenze (Modul D) für das Bauteil Wand in der Sanierung mit Bauteilaktivierung (BTA-Wand-san), je 1 m² Wandfläche.

| Produkt bzw. Bauteilschicht | Szenario am Lebensende | Verwendeter Datensatz (Modul C) [18] | Flächengewicht [kg/m ²] | Anrechnung für Gutschrift (Modul D) | | Verwendeter Datensatz (Modul D) [18] |
|-----------------------------|------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|--------|--------------------------------------|
| Dämmung Calostat | Deponierung | Municipal waste landfill (EN15804 C4) | 9,9 | 95 % | 9,4 | |
| Heiz-/Kühlrohr | Stoffliche Verwertung | PEX pipe (EN15804 C3-C4) | 0,067 | 90 % | 0,736 | PEX pipe (EN15804 D) |
| Heiz-/Kühlrohr | Stoffliche Verwertung | PEX aluminium pipe (EN15804 C3-C4) | 0,0751 | 90 % | 0,6759 | PEX aluminium pipe (EN15804 D) |
| Beladeprofil | Stoffliche Verwertung | Recycling potential aluminium sheet | 3,72 | 95 % | 3,53 | Recycling potential aluminium sheet |
| KlimaSan Profil | Stoffliche Verwertung | Recycling potential aluminium sheet | 2,49 | 95 % | 2,366 | Recycling potential aluminium sheet |
| Gipskartonplatte | Deponierung | Municipal waste landfill (EN15804 C4) | 17 | 95 % | 16,15 | |

A.3 Ökobilanzmodelle der Windheizung 2.0-Komponenten (Ökobilanz)

A.3.1 Ökobilanzmodell des Hochtemperatur-Steinspeichers (HTSS)

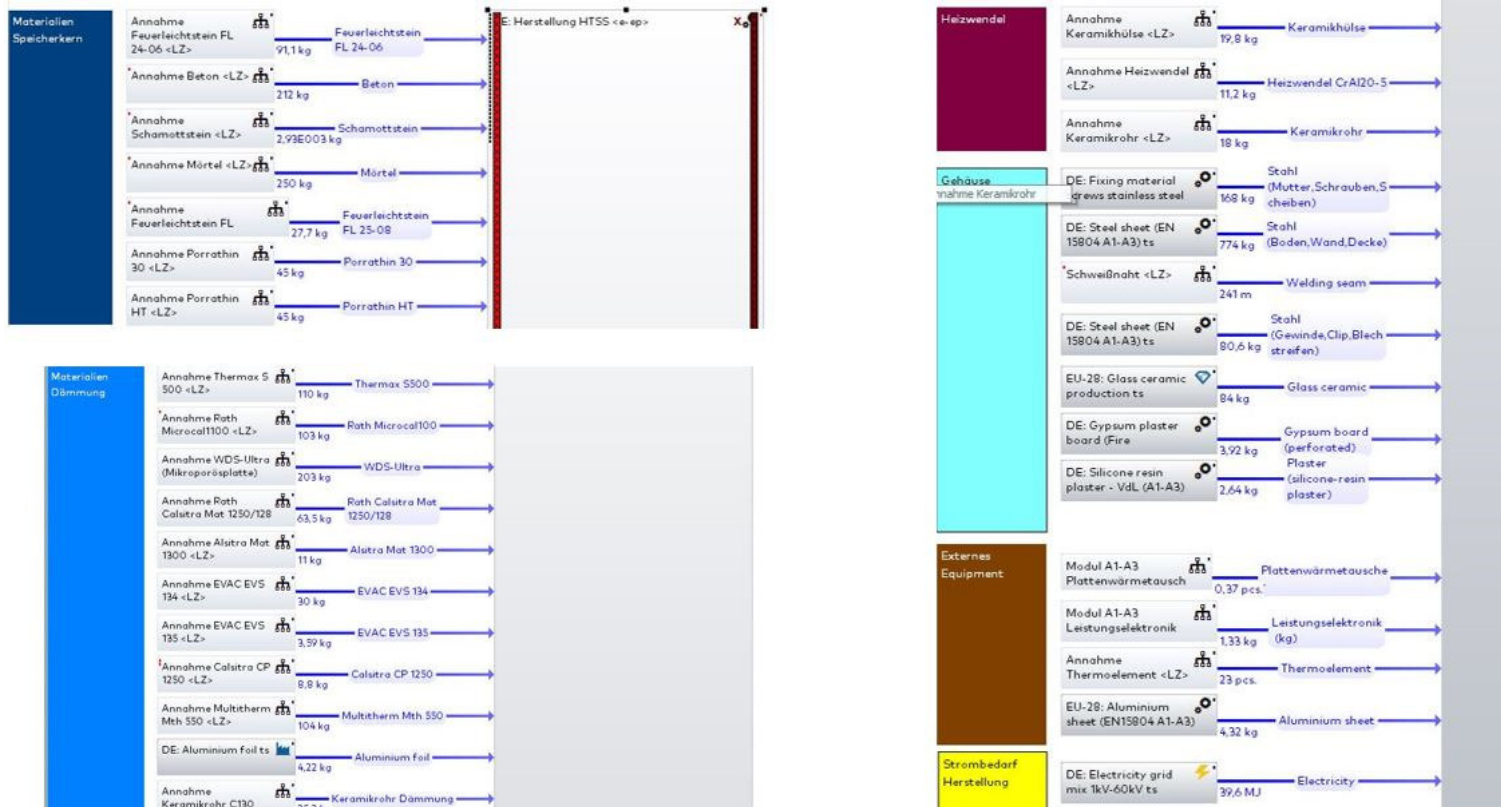


Bild 277:
Auszug aus der Software GaBi [18] – Ökobilanzmodell Herstellung HTSS.

Lebensende (EoL) und Gutschriften HTSS (Modul C + Modul D)
 GaBi Prozess-Präferenzregeln

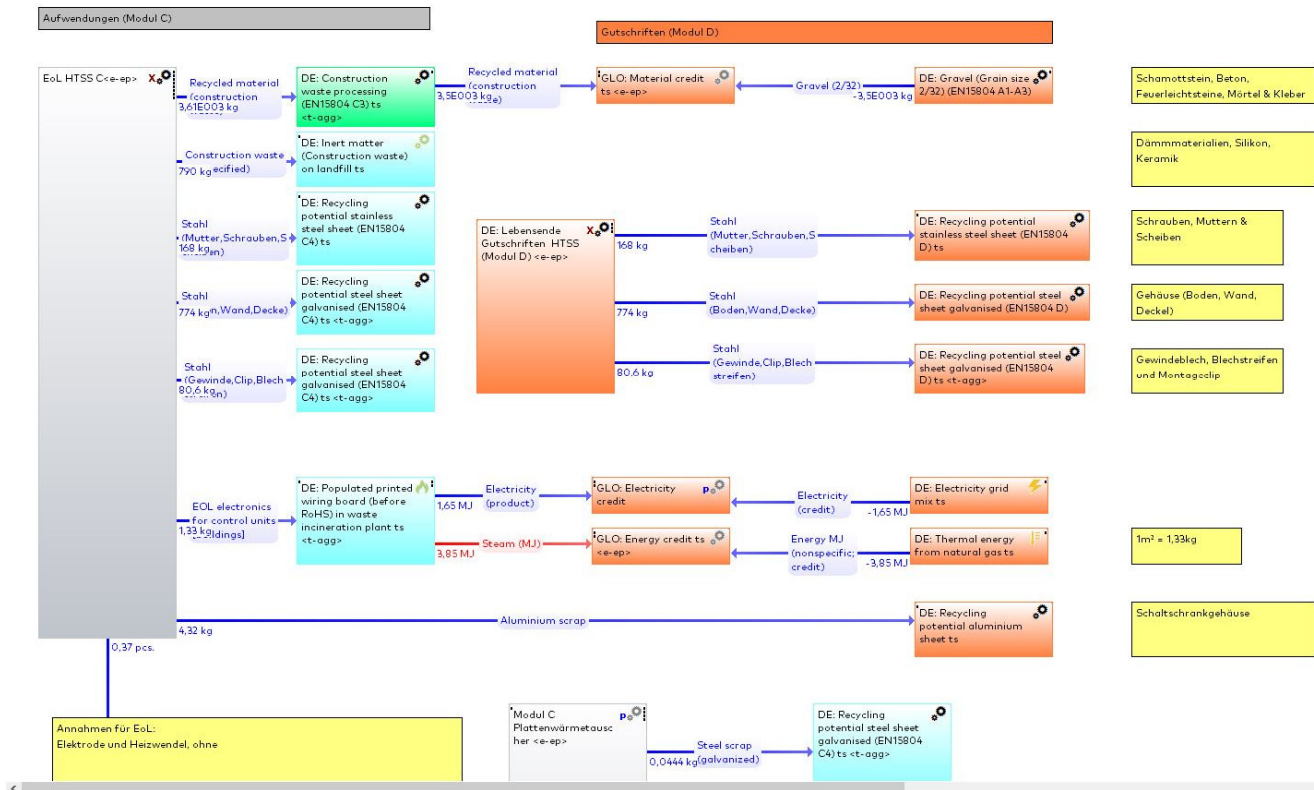


Bild 278:
 Auszug aus der Software GaBi [18] – Ökobilanzmodell Lebensende HTSS.

A.3.2 Ökobilanzmodell der Bauteilaktivierung (BTA) Decke



Bild 279:
 Auszug aus der Software GaBi [18] – Ökobilanzmodell Lebenszyklus Neubau Decke, delta.

Annahmen:
 - einseitige Dämmung 1x 4cm
 - Anschlussleitung Baladung: 0,7m/m² mit Rohrdurchmesser 16mm
 - Anschlussleitung Entladung: 0,4 m/m² mit Rohrdurchmesser 16mm
 Mineralische Ausgleichsmasse entspricht Flex Fliesenkleber (Zement Fliesenmörtel)
 - Abstandshalterung abgehängte Decke 4 pro m² (EU-28 Aluminium profile)
 - Schrauben und andere Befestigungskomponenten wurden vernachlässigt

Selection: Lebn

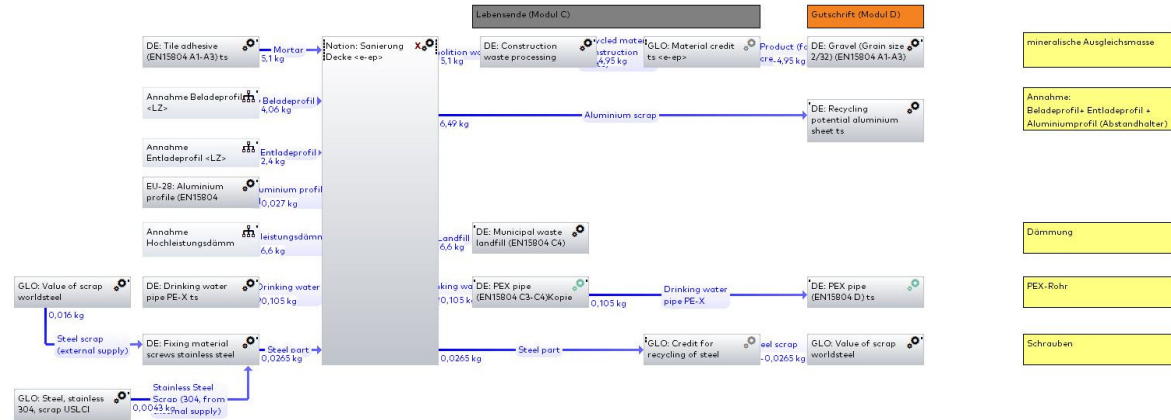


Bild 280:
 Auszug aus der Software GaBi [18] – Ökobilanzmodell Lebenszyklus Sanierung Decke.

A.3.3 Ökobilanzmodell der Bauteilaktivierung (BTA) Wand

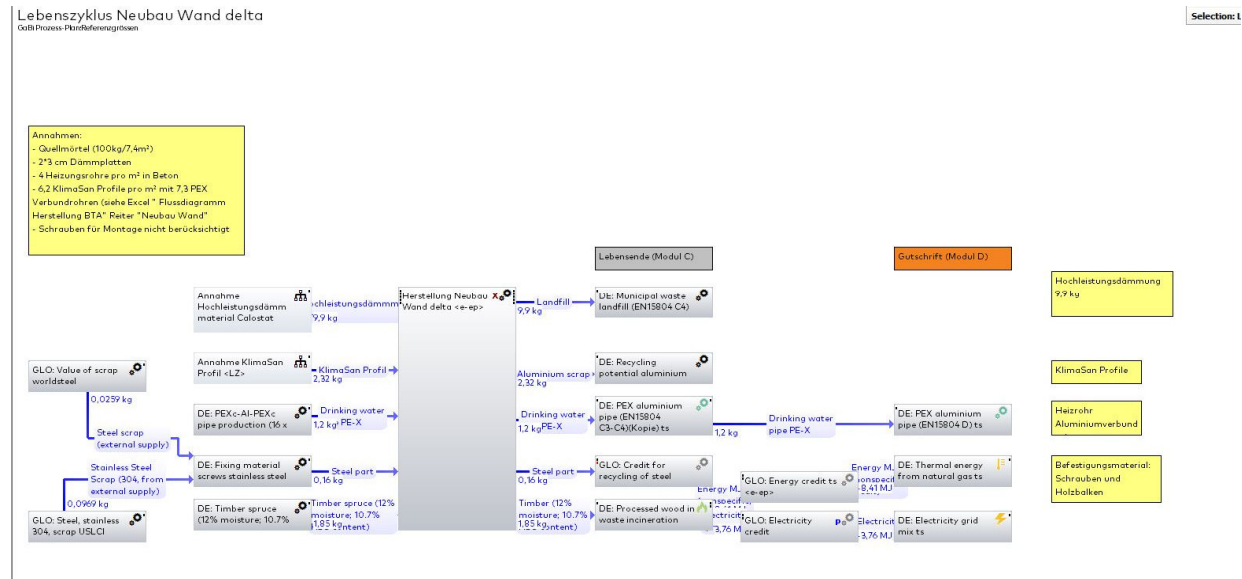


Bild 281:
Auszug aus der Software GaBi [18] – Ökobilanzmodell Lebenszyklus Neubau Wand, delta.

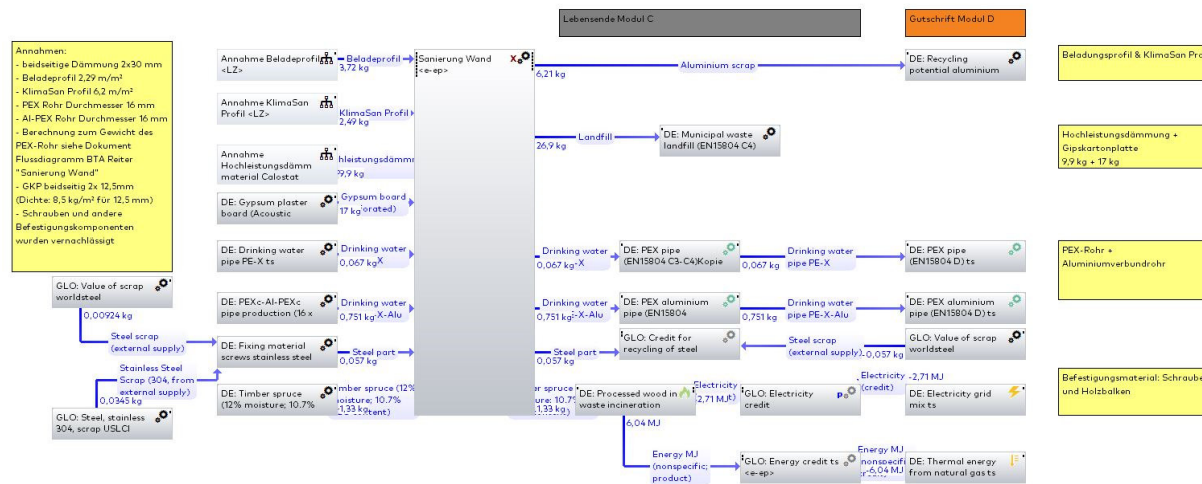


Bild 282:
Auszug aus der Software GaBi [18] – Ökobilanzmodell Lebenszyklus Sanierung Wand.

A.4 Ökobilanzmodell zur Entwicklung des deutschen Strom-Mix bis zum Jahr 2050

Im Rahmen der Analyse der Zukunftsszenarien spielt die zukünftige Entwicklung des deutschen Strom-Mix und eine geeignete Abbildung mit Hilfe eines Ökobilanzmodells eine wichtige Rolle. Da davon auszugehen ist, dass sich die Zusammensetzung der Energieträger für den deutschen Strom-Mix signifikant verändern wird [40] [41] werden in diesem Anhang die Details der Modellbildung für die Abbildung des zukünftigen Strom-Mix erläutert.

BMWi-Basisszenario

Basis der Modellbildung bilden die „Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland“ des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz BMWK (vormals Bundesministerium für Wirtschaft und Energie BMWi). Es wird das „Basisszenario“ für die Entwicklung des deutschen Strom-Mix zu Grunde gelegt. Das Basisszenario stellt das zentrale Zielszenario der Langfristszenarien dar und unterstellt das Erreichen der Klima- und Energieziele zu möglichst geringen Kosten. [23]

Anmerkung: Für eine einfache Verständlichkeit und Nachvollziehbarkeit wird im Projektbericht der gängige Begriff der „BMWi-Szenarien“ genutzt. Die Angaben und Eingangsdaten des BMWi-Basisszenarios stellen Informationen zum Zeitpunkt September 2017 (Datum der Veröffentlichung der BMWi-Szenarien) dar.

Für das BMWi-Basiszenario [23] werden die Informationen zur Stromerzeugung (in GW und in TWh) gemäß Berechnungen für Deutschland zu Grunde gelegt. Der im Basisszenario ausgewiesene Energieträger „andere Konventionelle“ wird für die Modellbildung als Energieträger „Öl“ angenommen. Der Anteil aus dem Energieträger „Andere EE“ wird der Stromerzeugung aus „Wasserkraft“ zugeordnet. Die Stromerzeugung aus „Wind onshore“ und „Wind offshore“ wird als „Windkraft“ zusammengefasst. Die Erzeugung aus „KWK“ wird den entsprechenden im Szenario angegebenen Energieträgern zugeordnet. Da die Angaben des Basisszenarios zum Energieträger „Kohle KWK“ nicht eindeutig dem Energieträger Steinkohle oder Braunkohle zugeordnet werden können, wird der Wert prozentual auf beide Energieträger verteilt.

Tabelle 51 zeigt die gemäß Basisszenario prognostizierte Entwicklung des Strombedarfs gesamt für Deutschland in TWh im Jahr 2030, 2040 und 2050 sowie die hierfür eingesetzten Energieträger bzw. Energiequellen. Tabelle 52 stellt die Bedarfswerte in ihren relativen Anteilen für den gesamten prognostizierten Strombedarf in Deutschland dar. In Tabelle 53 werden die relativen Anteile der einzelnen Energiequellen auf die Stromerzeugung von 1 kWh (3,6 MJ) bezogen. Die Zeile Ex-/Importe zeigt den überschüssig erzeugten Strom (negativer Wert) der in andere Nachbarländer exportiert werden kann, sowie den zusätzlichen Strombedarf (positiver Wert), der aus anderen Ländern importiert werden muss, um den Strombedarf in Deutschland zu decken. Importe werden nach Basisszenario erst im Jahr 2050 notwendig.

Tabelle 51:

Stromerzeugung gesamt in TWh inklusive Import Deutschland, BMWi-Basiszenario [23].

| Stromerzeugung nach Energiequellen inklusive Import in [TWh] | 2030 | 2040 | 2050 |
|---|--------------|--------------|--------------|
| Kernenergie | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| Braunkohle | 104,1 | 44,3 | 0,0 |
| Steinkohle | 59,6 | 21,8 | 22,5 |
| Erdgas | 74,7 | 72,7 | 33,6 |
| Öl | 9,5 | 5,7 | 2,9 |
| Windkraft | 181,1 | 312,6 | 335,1 |
| Photovoltaik | 47,2 | 47,5 | 63,2 |
| Biomasse | 53,6 | 45,7 | 25,8 |
| Wasserkraft | 18,1 | 18,1 | 18,1 |
| Summe exklusive Exporte/Importe | 547,9 | 568,4 | 501,2 |
| Ex-/Importe | -46,0 | -18,6 | 105,0 |
| Strombedarf Deutschland | 501,9 | 549,8 | 606,2 |

Tabelle 52:

Stromerzeugung gesamt in % inklusive Import Deutschland, BMWi-Basiszenario [23].

| Stromerzeugung nach Energiequellen inklusive Import in [%] | 2030 | 2040 | 2050 |
|---|-------------|-------------|--------------|
| Kernenergie | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| Braunkohle | 19,01 | 7,8 | 0,0 |
| Steinkohle | 10,87 | 3,83 | 3,71 |
| Erdgas | 13,63 | 12,79 | 5,54 |
| Öl | 1,73 | 1,0 | 0,48 |
| Windkraft | 33,05 | 55,0 | 55,28 |
| Photovoltaik | 8,61 | 8,36 | 10,43 |
| Biomasse | 9,78 | 8,04 | 4,26 |
| Wasserkraft | 3,3 | 3,18 | 2,99 |
| Import | 0,0 | 0,0 | 17,32 |

Tabelle 53:
Stromerzeugung nach Energiequellen in MJ inklusive Import Basisszenario je 1kWh (3,6 MJ) Strom [23].

| Stromerzeugung nach Energiequellen inklusive Import [MJ] | 2030 | 2040 | 2050 |
|---|-------------|-------------|-------------|
| Kernenergie | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| Braunkohle | 0,68 | 0,28 | 0,0 |
| Steinkohle | 0,39 | 0,14 | 0,13 |
| Erdgas | 0,49 | 0,46 | 0,2 |
| Öl | 0,06 | 0,04 | 0,02 |
| Windkraft | 1,19 | 1,98 | 1,99 |
| Photovoltaik | 0,31 | 0,30 | 0,38 |
| Biomasse | 0,35 | 0,29 | 0,15 |
| Wasserkraft | 0,12 | 0,11 | 0,11 |
| Import | 0,0 | 0,0 | 0,62 |

Für die Importe in Deutschland im Jahr 2050 wird die Stromerzeugung Europa nach BMWi-Basisszenario zugrunde gelegt. Tabelle 54 fasst die gemäß Basisszenario prognostizierte Entwicklung des europäischen Strombedarfs gesamt in TWh für die Jahre 2030, 2040 und 2050 sowie die hierfür eingesetzten Energieträger bzw. Energiequellen zusammen. Tabelle 55 stellt die europäischen Bedarfswerte in ihren relativen Anteilen über den Zeitverlauf dar, die für die Modellbildung genutzt werden.

Tabelle 54:
Stromerzeugung gesamt in TWh in Europa, BMWi-Basisszenario [23].

| Stromerzeugung Europa nach Energiequellen [TWh] | 2030 | 2040 | 2050 |
|--|----------------|----------------|----------------|
| Kernenergie | 596,5 | 476,7 | 373,6 |
| Braunkohle | 33,5 | 14,8 | 0,0 |
| Steinkohle | 351,5 | 144,4 | 8,9 |
| Erdgas | 137,4 | 22,8 | 8,1 |
| Öl | 31,5 | 18,4 | 9,2 |
| Windkraft | 1.005,7 | 1.630,1 | 1.949,8 |
| Photovoltaik | 267,6 | 438,1 | 496,1 |
| Solarthermie | 17,2 | 124,1 | 168,9 |
| Biomasse | 254,4 | 257,5 | 257,5 |
| Wasserkraft | 622,9 | 623,5 | 623,5 |
| Summe | 3.318,2 | 3.750,4 | 3.895,6 |

Tabelle 55:
Stromerzeugung gesamt in Prozent in Europa, BMWi-Basisszenario [23].

| Stromerzeugung Europa nach Energiequellen [%] | 2030 | 2040 | 2050 |
|--|-------------|-------------|-------------|
| Kernenergie | 17,98 | 12,71 | 9,59 |
| Braunkohle | 1,01 | 0,39 | 0,0 |
| Steinkohle | 10,59 | 3,85 | 0,23 |
| Erdgas | 4,14 | 0,61 | 0,21 |
| Öl | 0,95 | 0,49 | 0,24 |
| Windkraft | 30,31 | 43,46 | 50,05 |
| Photovoltaik | 8,06 | 11,68 | 12,73 |
| Solarthermie | 0,52 | 3,31 | 4,34 |
| Biomasse | 7,67 | 6,87 | 6,61 |
| Wasserkraft | 18,77 | 16,62 | 16,01 |

Für die Modellbildung wird ein spezifisches Ökobilanzmodell im Software und Datenbanksystem GaBi ts v. 10 mit Service Pack (SP) SP 40 [18] aufgebaut und die Energieträgerzusammensetzung zum jeweils genannten Zeitpunkt abgebildet. Die hierfür verwendeten Datensätze sind in Tabelle 56 und Tabelle 57 zusammen gefasst. Bild 283 und Bild 284 dokumentieren die Modellbildung in der Software GaBi.

Tabelle 56:
Modellbildung, Stromerzeugung Deutschland und verwendete Datensätze [18].

| Energiequelle Stromerzeugung Deutschland | GaBi Datensatz |
|---|---|
| Kernenergie | DE: Electricity from nuclear, 2016 |
| Braunkohle | DE: Electricity from lignite, 2016 |
| Steinkohle | DE: Electricity from hard coal, 2016 |
| Erdgas | DE: Electricity from natural gas, 2016 |
| Öl | DE: Electricity from heavy fuel oil, 2016 |
| Windkraft | DE: Electricity from Wind power, 2016 |
| Photovoltaik | DE: Electricity from photovoltaic, 2016 |
| Biomasse | DE: Electricity from biomass, 2016 |
| Wasser | DE: Electricity from hydro power, 2016 |

Tabelle 57:
Modellbildung, Stromerzeugung Europa (Importe) und verwendete Datensätze [18].

| Energiequelle der Stromerzeugung Europa (Import) | GaBi Datensatz |
|--|---|
| Kernenergie | EU: Electricity from nuclear, 2016 |
| Braunkohle | EU: Electricity from lignite, 2016 |
| Steinkohle | EU: Electricity from hard coal, 2016 |
| Erdgas | EU: Electricity from natural gas, 2016 |
| Öl | EU: Electricity from heavy fuel oil, 2016 |
| Windkraft | EU: Electricity from Wind power, 2016 |
| Photovoltaik | EU: Electricity from photovoltaic, 2016 |
| Solarthermie | EU: Electricity from solar thermal, 2016 |
| Biomasse | EU: Electricity from biomass, 2016 |
| Wasser | EU: Electricity from hydro power, 2016 |

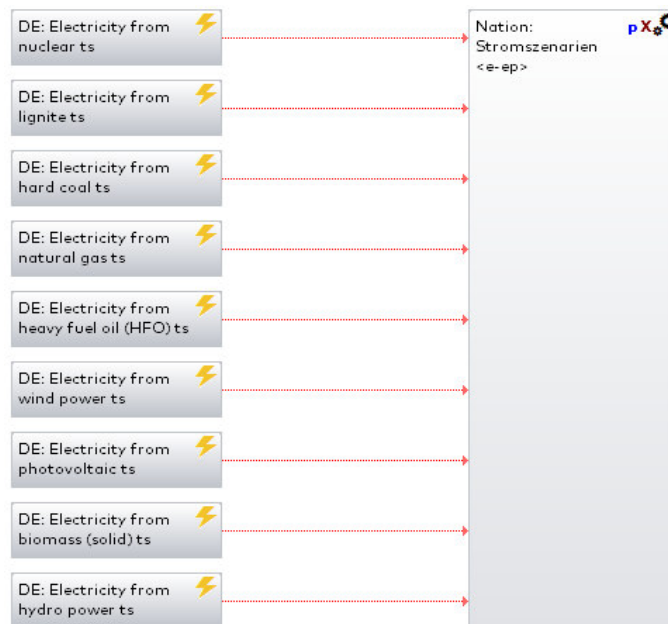


Bild 283:
Modellbildung, Strom-Mix Deutschland und verwendete Datensätze [18].

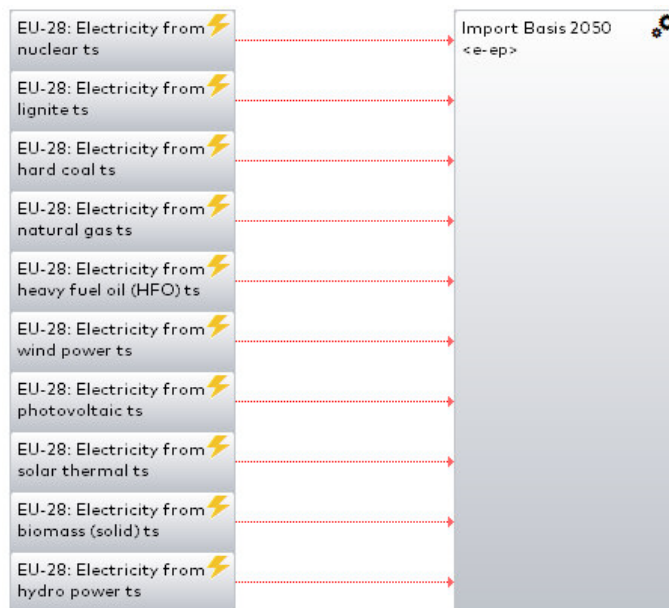


Bild 284:

Modellbildung, Stromimport aus Europa nach Deutschland und verwendete Datensätze [18].

Für die Abbildung der zukünftigen Entwicklung des deutschen Strom-Mix wird folgender Ansatz zu Grunde gelegt:

Es werden Stützstellen für die Jahre 2020, 2030, 2040 und 2050 definiert. Für die anschließende Ermittlung der potenziellen Umweltwirkungen für die Betrachtungszeitpunkte ab 2022 wird zwischen den Stützstellen linear interpoliert. Die zeitlichen Verlaufskurven der angenommenen Entwicklung der potenziellen Umweltwirkungen bis zum Jahr 2050 sind den nachfolgenden Bild 285 bis Bild 286 dargestellt. Die Betrachtungszeitpunkte 2022 (Startzeitpunkt der Analyse) und 2047 (Endzeitpunkt nach 25 Jahren Betrachtungszeitraum) für die Gebäude-Ökobilanz sind ebenfalls durch Markierung hervorgehoben. Es werden die potenziellen Umweltwirkungen ausgewählter Umweltindikatoren visualisiert, die in Anlehnung an DIN EN 15804+A1 [14] und konsistent zu den Vorgaben der Ökobilanz der Windheizung 2.0-Konzepte in Kapitel 3.2 ermittelt sind.

Die Umweltindikatoren GWP (Bild 285) und PENRT (Bild 286) sinken bis zum Jahr 2050. Die Gründe liegen v.a. in der Umstellung von fossilen auf erneuerbare Energieträger und der Reduktion der Stromerzeugung aus Braunkohle und Steinkohle.

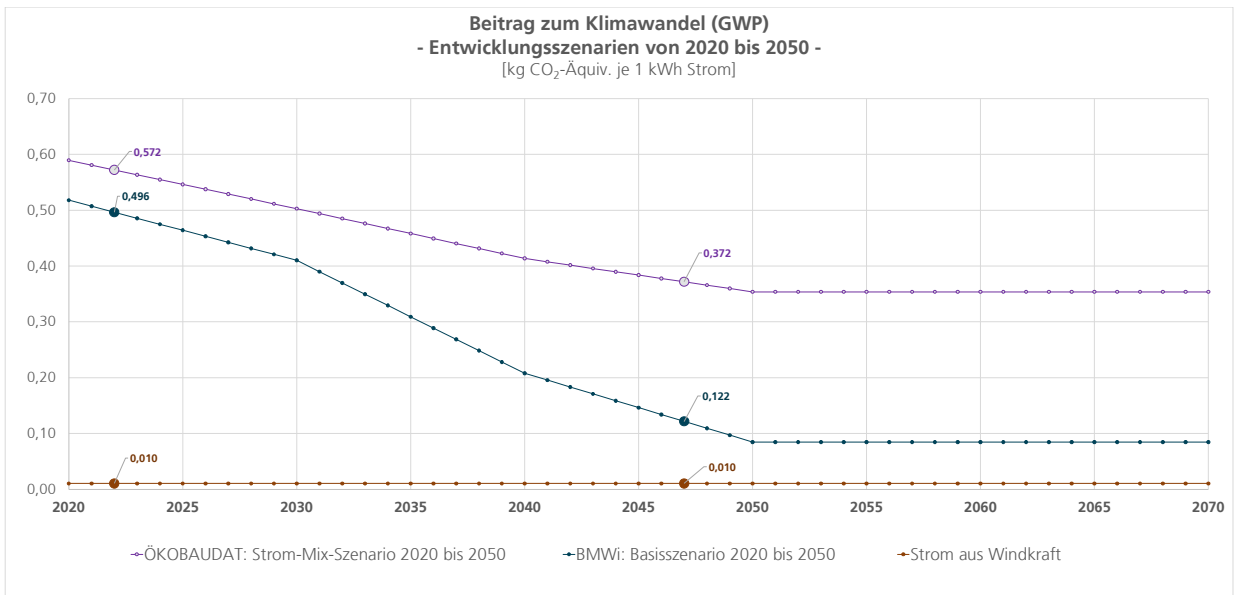


Bild 285:
Annahme zum Verlauf des Globales Erwärmungspotenzials (GWP) für die Jahre 2020 bis 2050 für den deutschen Strom-Mix [Eigene Darstellung und Berechnung].

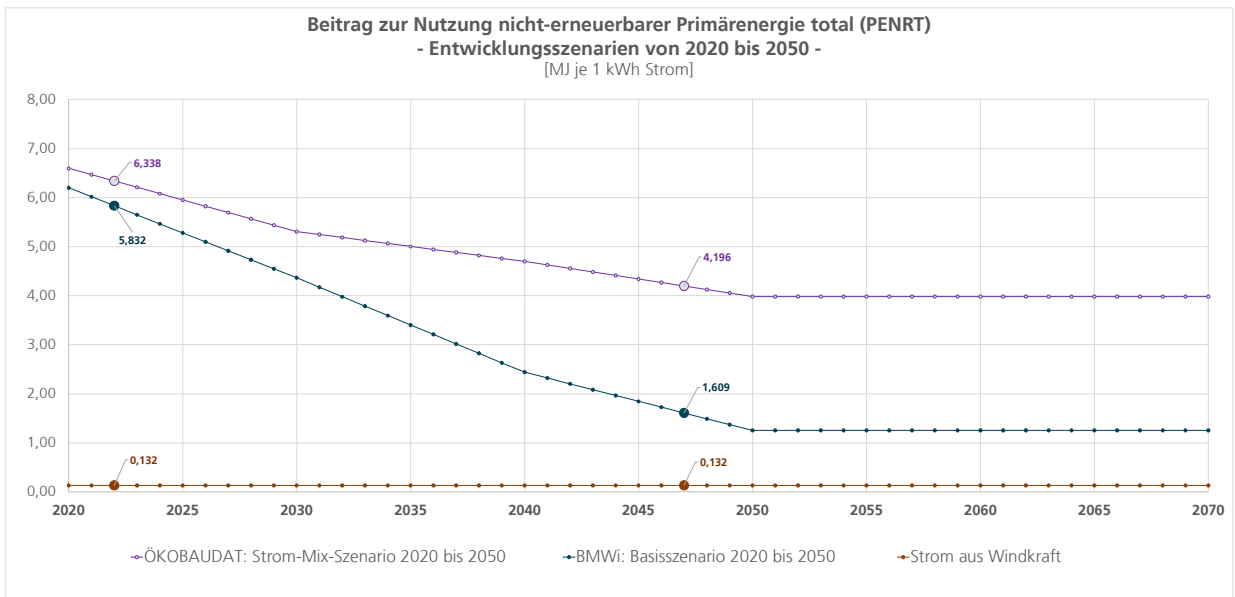


Bild 286:
Annahme zum Verlauf des Primärenergiebedarfs nicht erneuerbar (PENRT) für die Jahre 2020 bis 2050 für den deutschen Strom-Mix [Eigene Darstellung und Berechnung].

A.5 Eingangsdaten „Ökobilanz Windheizung 2.0-Konzepte“ und „Parameterstudie“

Nachfolgend werden die spezifischen Eingangsdaten für die Ökobilanz der Windheizung 2.0-Konzepte (vergleiche Kapitel 3.2) sowie die Eingangsdaten für die Gebäude der Parameterstudie (vergleiche Kapitel 6.4) dokumentiert.

Tabelle 58:

Übersicht der Hauptkomponenten zur Raumwärmebereitstellung und Lüftung bei Bilanzierung verschiedener Konzepte: Konzept 0 entspricht der GEG-Referenz.

| | Konzept 0 GEG | Konzept 1: WWS | Konzept 2: HTSS | Konzept 3: BTA |
|--|------------------|-------------------|--------------------|-------------------|
| Raumwärmebereitstellung und TWW | | | | |
| Gasbrennwertgerät | vorhanden | nein | nein | nein |
| Wärmepumpe: Wasser-Wasser | nein | nein | nein | vorhanden |
| Hochtemperatur-Steinspeicher (HTSS) | nein | nein | vorhanden | nein |
| Frischwasserstation /-modul | nein | vorhanden | vorhanden | vorhanden |
| Solarthermie | vorhanden | nein | nein | nein |
| Nachheizung: Raumwärme und TWW | | | | |
| Durchlauferhitzer 1: nur für Raumwärme | nein | vorhanden | nein | nein |
| Durchlauferhitzer 2: nur für TWW | nein | vorhanden | nein | nein |
| Durchlauferhitzer 3: Raumwärme und TWW | nein | vorhanden | nein | vorhanden |
| Elektroheizstab: nur für TWW | nein | nein | vorhanden | vorhanden |
| Heißluft-Nachheizer: nur Raumwärme | nein | nein | vorhanden | nein |
| Wärmeverteilung und -speicherung | | | | |
| Wärmetauscher 1: Heißluft-TWW (Platten-WT) | nein | nein | vorhanden | nein |
| Wärmetauscher 2: Heißluft - Zuluft (Platten-WT) | nein | nein | vorhanden | nein |
| Schichtenkombi-Speicher: Raumwärme und TWW | nein | nein | vorhanden | vorhanden |
| Solarpufferspeicher | vorhanden | nein | nein | nein |
| Wasser-WindperiodenSpeicher (WWS) | nein | vorhanden | nein | nein |
| Pumpe 1: Durchlauferhitzer | nein | vorhanden | nein | vorhanden |
| Pumpe 3: Ladepumpe TWW-Speicher | nein | nein | vorhanden | nein |
| Pumpe 4: vom Verteilerbalken BTA | nein | nein | nein | vorhanden |
| Pumpe 5: zum Verteilerbalken aaktive Entladung | vorhanden | vorhanden | nein | vorhanden |
| Wärmeübergabe | | | | |
| Übergabesystem 1: Radiatoren | vorhanden | nein | nein | nein |
| Übergabesystem 2: Flächenheizung, abgebildet als Fußbodenheizung | nein | vorhanden | nein | nein |
| Übergabesystem 3: Flächenheizung, abgebildet als Deckenheizung | nein | nein | nein | vorhanden |
| Lüftung | | | | |
| zentral: Abluftanlage | vorhanden | nein | nein | nein |
| zentral: Zu- und Abluftanlage mit WRG | nein | vorhanden | vorhanden | vorhanden |
| Ventilator 1: Heißluftventilator | nein | nein | vorhanden | nein |

Tabelle 59:
Übersicht der Eingangsdaten für die Beispielgebäude der Parameterstudie: all-
gemeine Charakteristik und angesetzte Bauteile der thermischen Gebäudehülle
im Falle Neubau und Sanierung.

| | | Demo-Objekte | | IWU-Gebäudetypologie | | |
|--|--|--------------|--------|----------------------|-----------|-----------|
| | | ZH | LH | RH J | EFH G | EFH J |
| ALLGEMEINES | | | | | | |
| Baujahr | von - bis | | | 2002-2009 | 1979-1983 | 2002-2009 |
| Bilanzierungsgegenstand | als Neubau | X | X | X | | X |
| | als Sanierung | X | X | X | X | |
| Anzahl Vollgeschosse | | 2 | 3 | 2 | 2 | 2 |
| Keller | (x) vorhanden | (x) | (x) | (x) | (x) | (x) |
| | () nicht vorhanden | | | | | |
| | (x) beheizt | (x) N | (x) N | (-)/() | () | () |
| | (-) teilweise beheizt () nicht beheizt | () S | () S | | | |
| Dach | Typ | Sattel | Sattel | Sattel | Sattel | Sattel |
| | (x) beheizt | (x) N | (x) N | (x) | (x) | (x) |
| | (-) teilweise beheizt | () S | () S | | | |
| | () nicht beheizt | | | | | |
| Bauteile der thermischen Hülle angesetzt im Fall Neubau (N) | Bodenplatte | X | X | X | | X |
| | Außenwand, Keller | X | X | X | | X |
| | Kellergeschossdecke | | | | | |
| | Außenwand, oberirdisch | X | X | X | | X |
| | Fenster | X | X | X | | X |
| | Türen | X | X | X | | X |
| | oberste Geschossdecke | | | | | |
| | Dach | X | X | X | | X |
| Bauteile der thermischen Hülle angesetzt im Fall Bestandsgebäude (B) | Bodenplatte | | | | | |
| | Außenwand, Keller | | | | | |
| | Kellergeschossdecke | X | X | X | X | X |
| | Außenwand, oberirdisch | X | X | X | X | X |
| | Fenster | X | X | X | X | X |
| | Türen | X | X | X | X | X |
| | oberste Geschossdecke | | | | | |
| | Dach | X | X | X | X | X |
| Bauteile der thermischen Hülle angesetzt im Fall Sanierung (S) | Bodenplatte | | | | | |
| | Außenwand, Keller | | | | | |
| | Kellergeschossdecke | X | X | X | X | X |
| | Außenwand, oberirdisch | X | X | X | X | X |
| | Fenster | X | X | X | X | X |
| | Türen | X | X | X | X | X |
| | oberste Geschossdecke | | | | | |
| | Dach | X | X | X | X | X |

Tabelle 60:
Übersicht der Eingangsdaten für die Beispielgebäude der Parameterstudie: an-
gesetzte Bauteilflächen der thermischen Gebäudehülle im Falle Neubau und Sa-
nierung.

| | | Demo-Objekte | | IWU-Gebäudetypologie | | |
|---|---|-----------------|---------------|----------------------|---------------|---------------|
| | | ZH | LH | RH J | EFH G | EFH J |
| Gebäude-Flächen [m²] | | | | | | |
| Wohnfläche (Wfl) | Wohnfläche, gesamt (WF) | | | | | |
| | Beheizte Wohnfläche (Wfl, b) | | | 138 | 196 | 133 |
| Energiebezugsfläche | Energiebezugsfläche | | | 151,9 | 215,6 | 146,5 |
| Nettoraumfläche (NRF) | NRF 1 (thermisch u. nicht thermisch konditioniert) | 243 | 434 | | | |
| | NRF 2 (nur thermisch konditioniert) | 154 | 434 | | | |
| Gebäudenutzfläche | Gebäudenutzfläche (A _N) | | | 154,6 | 207 | 153,3 |
| | Gewählte Bezugsfläche für LCA | 154 | 434 | 154,6 | 207 | 153,3 |
| Bauteil-Flächen [m²] | | | | | | |
| KG320: Gründung | | | | | | |
| | Bodenplatte | 105,45 | 121 | 70,7 | 83,4 | 79,8 |
| | Ansatz Gebäudemodell NEUBAU | 105,45 | 121 | 70,7 | 83,4 | 79,8 |
| | Ansatz Gebäudemodell Sanierung | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| KG330: Außenwände (opak) | | | | | | |
| Ausgangswerte | Außenwände - oberirdisch | 151,33 | 284,66 | 140,7 | 159,4 | 188,9 |
| | Außenwände - unterirdisch | 136,23 | 131,92 | 70,35 | 79,7 | 94,45 |
| | GESAMT Außenwand | 287,56 | 416,58 | 211,05 | 239,1 | 283,35 |
| KG330: Außenwände (transluszent) | | | | | | |
| Ausgangswerte | Fensterfläche, oberirdisch [m²] | 22,14 | 54,89 | 36,3 | 27 | 28,3 |
| | Fensterflächenanteil [%] | 13% | 16% | 21% | 14% | 13% |
| für Parameterstudie angesetzt | Fensterflächen: Lochfassade | 22,14 | 54,89 | 17,70 | 27 | 28,3 |
| für Parameterstudie angesetzt | Fensterflächen: Standard / normal | 52,04 | 101,87 | 36,3 | 55,92 | 65,16 |
| KG330: Außenwände (opak) | | | | | | |
| | Außenwände - oberirdisch | 151,33 | 284,66 | 159,30 | 159,4 | 188,9 |
| | Ansatz Gebäudemodell NEUBAU | 121,43 | 237,69 | 140,7 | 130,48 | 152,04 |
| | Lochfassade: ca. 15% Fensteranteil | 287,56 | 416,58 | 229,65 | | 283,35 |
| | Normalfassade: ca. 30% Fensteranteil | 257,66 | 369,61 | 211,05 | | 246,49 |
| | Ansatz Gebäudemodell Sanierung | 151,33 | 284,66 | 159,3 | 159,4 | |
| | Lochfassade: ca. 15% Fensteranteil | 121,43 | 237,69 | 140,70 | 130,48 | |
| | Normalfassade: ca. 30% Fensteranteil | | | | | |
| KG330: Außenwände | | | | | | |
| | Türen | 2,00 | 2,42 | 2,00 | 2,00 | 2,00 |
| KG340: Innenwände | | | | | | |
| | Innenwände - oberirdisch | 120,59 | 202,51 | 81,72 | 109,42 | 81,03 |
| | Innenwände - unterirdisch | | 101,26 | | | |
| | GESAMT Innenwände | 120,59 | 303,77 | 81,72 | 109,42 | 81,03 |
| | Ansatz Gebäudemodell NEUBAU | 100% BTA | 120,59 | 303,77 | 81,72 | 81,03 |
| | Ansatz Gebäudemodell Sanierung | 100% BTA | 120,59 | 202,51 | 81,72 | 109,42 |
| KG350: Decken | | | | | | |
| | Kellergeschossdecke | 101,49 | 114,79 | 70,7 | 83,4 | 79,8 |
| | Geschossdecke, sonstige | | 114,79 | | | |
| | Geschossdecke, oberste | 101,49 | 114,79 | 70,7 | 83,4 | 79,8 |
| | GESAMT Geschossdecken | 202,98 | 344,37 | 141,4 | 166,8 | 159,6 |
| | Ansatz Gebäudemodell NEUBAU | 162,00 | 272,10 | 112,29 | | 126,74 |
| | Ansatz Gebäudemodell Sanierung | 81,00 | 181,40 | 56,14 | 66,23 | |
| KG360: Dach | | | | | | |
| | Dachfläche | 120,36 | 144,24 | 91,3 | 100,8 | 85,9 |
| | Ansatz Gebäudemodell NEUBAU | 120,36 | 144,24 | 91,3 | | 85,9 |
| | Ansatz Gebäudemodell Sanierung | 120,36 | 144,24 | 91,3 | 100,8 | |

Tabelle 61:

Übersicht der Eingangsdaten für die Validierung von Ökobilanzergebnissen im Planungstool: Endenergiebedarfswerte und angesetzte U-Werte für die Bauteile der thermischen Gebäudehülle.

| Gebäude | Analysegegenstand | Energiebedarfswerte | | | U-Wert [W/m²K] | | | | | | |
|---------|-------------------|---|---|--|----------------|------|-------------|-------------|---------|---------------------|----------|
| | | Primärenergiebedarf Referenzgebäude GEG [kWh/a] | Endenergiebedarf WH-Gebäude (GEG) [kWh/a] | Primärenergiebedarf WH-Gebäude [kWh/a] | Außenwand | Dach | Bodenplatte | Kellerdecke | Fenster | Wand gegen Erdreich | Außentür |
| ZH | Neubau | 15.818 | 4.113 | 7.403 | 0,11 | 0,09 | 0,18 | | 0,60 | 0,09 | 0,70 |
| ZH | Sanierung | 10.068 | 5.377 | 9.679 | 0,10 | 0,09 | | 0,19 | 0,51 | | 0,92 |
| LH | Neubau | 37.868 | 13.052 | 23.494 | 0,17 | 0,08 | 0,23 | | 0,80 | 0,19 | 0,79 |
| LH | Sanierung | 34.673 | 14.073 | 25.332 | 0,21 | 0,13 | | 0,22 | | 0,51 | 0,92 |
| RH J | Neubau | 17.016 | 6.118 | 11.012 | 0,15 | 0,12 | 0,14 | | 0,80 | 0,29 | 0,79 |
| RH J | Sanierung | 15.756 | 5.847 | 10.525 | 0,18 | 0,14 | | 0,20 | 1,29 | | 0,79 |

Tabelle 62:

Übersicht der Eingangsdaten für die Validierung von Ökobilanzergebnissen im Planungstool: Endenergiebedarfswerte und Windstromdeckungsgrad für ausgewählte Konzepte K1 (mit WWS).

| WH2.0-Konzept | | WWS 100% | | | | WWS 120% | | | |
|---------------|-------------------|----------------------------|---|--|-------------------|----------------------------|---|--|-------------------|
| Gebäude | Analysegegenstand | Windstrom-Deckungsgrad [%] | Spezifische Endenergie WH-Konzept [kWh/a] | Überschussstrom geladener Speicher [kWh/a] | Speichergröße [l] | Windstrom-Deckungsgrad [%] | Spezifische Endenergie WH-Konzept [kWh/a] | Überschussstrom geladener Speicher [kWh/a] | Speichergröße [l] |
| ZH | Neubau | 90 | 4.811 | 4.319 | 2.580 | 93 | 4.851 | 4.529 | 3.096 |
| ZH | Sanierung | 85 | 6.201 | 5.241 | 3.080 | 87 | 6.249 | 5.467 | 3.696 |
| LH | Neubau | 90 | 15.232 | 13.635 | 29.400 | 92 | 15.310 | 14.073 | 35.280 |
| LH | Sanierung | 85 | 16.232 | 13.729 | 25.800 | 87 | 16.308 | 14.117 | 30.960 |
| RH J | Neubau | 90 | 7.143 | 6.396 | 4.450 | 93 | 7.199 | 6.681 | 5.340 |
| RH J | Sanierung | 85 | 6.757 | 5.759 | 3.150 | 89 | 6.813 | 6.050 | 3.780 |

Tabelle 63:

Übersicht der Eingangsdaten für die Validierung von Ökobilanzergebnissen im Planungstool: Endenergiebedarfswerte und Windstromdeckungsgrad für ausgewählte Konzepte K2 (mit HTSS).

| WH2.0-Konzept | | HTSS 100% | | | | HTSS 120% | | | |
|---------------|-------------------|----------------------------|---|--|---------------------|----------------------------|---|--|---------------------|
| Gebäude | Analysegegenstand | Windstrom-Deckungsgrad [%] | Spezifische Endenergie WH-Konzept [kWh/a] | Überschussstrom geladener Speicher [kWh/a] | Speichergröße [kWh] | Windstrom-Deckungsgrad [%] | Spezifische Endenergie WH-Konzept [kWh/a] | Überschussstrom geladener Speicher [kWh/a] | Speichergröße [kWh] |
| ZH | Neubau | 90 | 4.807 | 4.302 | 179 | 93 | 4.849 | 4.522 | 215 |
| ZH | Sanierung | 85 | 6.204 | 5.254 | 218 | 88 | 6.251 | 5.481 | 262 |
| LH | Neubau | 90 | 15.232 | 13.633 | 2.056 | 92 | 15.309 | 14.070 | 2.467 |
| LH | Sanierung | 85 | 16.230 | 13.715 | 1.791 | 86 | 16.303 | 14.099 | 2.150 |
| RH J | Neubau | 90 | 7.147 | 6.415 | 315 | 93 | 7.202 | 6.698 | 378 |
| RH J | Sanierung | 85 | 6.742 | 5.697 | 212 | 88 | 6.803 | 5.999 | 255 |

Tabelle 64:

Übersicht der Eingangsdaten für die Validierung von Ökobilanzergebnissen im Planungstool: Endenergiebedarfswerte und Windstromdeckungsgrad für ausgewählte Konzepte K3 (mit BTA).

| WH2.0-Konzept | | BTA Decke+Wand | | | BTA Decke | | |
|---------------|-------------------|----------------------------|---|--|----------------------------|---|--|
| Gebäude | Analysegegenstand | Windstrom-Deckungsgrad [%] | Spezifische Endenergie WH-Konzept [kWh/a] | Überschussstrom geladener Speicher [kWh/a] | Windstrom-Deckungsgrad [%] | Spezifische Endenergie WH-Konzept [kWh/a] | Überschussstrom geladener Speicher [kWh/a] |
| ZH | Neubau | 100 | 4.927 | 4.920 | 98 | 4.903 | 4.790 |
| ZH | Sanierung | 96 | 6.381 | 6.128 | 88 | 6.258 | 5.521 |
| LH | Neubau | 81 | 14.955 | 12.150 | 78 | 14.824 | 11.492 |
| LH | Sanierung | 79 | 16.041 | 12.729 | 76 | 15.905 | 12.035 |
| RH J | Neubau | 87 | 6.969 | 6.089 | 82 | 6.885 | 5.679 |
| RH J | Sanierung | 92 | 6.870 | 6.330 | 81 | 6.696 | 5.454 |

A.6 Detailergebnisse Ökobilanz GWP ausgewählter Windheizung 2.0-Konzepte

Tabelle 65:
Detailergebnisse Ökobilanz GWP, Haus Leitershofen (LH), Neubau und Sanierung.

| LH - NEUBAU Ergebnisse Ökobilanz (vor DELTA-Bildung) Beitrag zum Treibhauspotenzial (GWP) in kg CO ₂ -Äquiv./ (m ² *a) | Windheizung 2.0-Konzept | | | | | | |
|--|-------------------------|-------------|--------------|-------------|-------------|--------------|--------------|
| | GEG-Referenz | K1-WWS100 | K2-HTSS100 | K3-BTA-DE | K1_WWS120 | K2-HTSS120 | K3-BTA-DE-WA |
| Gebäudekonstruktion (gesamt) | 0,47 | 2,94 | 8,55 | 1,91 | 3,23 | 10,04 | 3,42 |
| aus konstruktivem Mehr-/Minderaufwand der Baukonstruktion (KG300, DIN276) | 0,00 | 1,04 | 1,04 | 1,04 | 1,04 | 1,04 | 1,04 |
| aus konstruktivem Mehr-/Minderaufwand der Technischen Anlagen (KG400, DIN276) | 0,47 | 1,90 | 7,51 | 0,88 | 2,19 | 9,01 | 2,38 |
| Gebäudebetrieb (gesamt) | 18,27 | 1,52 | 1,52 | 2,75 | 1,26 | 1,26 | 2,38 |
| aus vermiedener Wärmebereitstellung | 17,02 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| aus Nutzung von Netzstrom (Strom konventionell) | 1,25 | 1,19 | 1,19 | 2,47 | 0,92 | 0,92 | 2,08 |
| aus Nutzung von Überschusstrom (bei Starkwind) | 0,00 | 0,33 | 0,33 | 0,28 | 0,34 | 0,34 | 0,29 |
| Lebenszyklus (gesamt) | 18,74 | 4,45 | 10,07 | 4,67 | 4,48 | 11,30 | 5,80 |

| LH - NEUBAU Ergebnisse Ökobilanz (DELTA) Beitrag zum Treibhauspotenzial (GWP) in kg CO ₂ -Äquiv./ (m ² *a) | Windheizung 2.0-Konzept | | | | | |
|--|-------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| | K1-WWS100 | K2-HTSS100 | K3-BTA-DE | K1_WWS120 | K2-HTSS120 | K3-BTA-DE-WA |
| Gebäudekonstruktion (gesamt) | 2,47 | 8,08 | 1,44 | 2,75 | 9,57 | 2,95 |
| aus konstruktivem Mehr-/Minderaufwand der Baukonstruktion (KG300, DIN276) | 1,04 | 1,04 | 1,04 | 1,04 | 1,04 | 1,04 |
| aus konstruktivem Mehr-/Minderaufwand der Technischen Anlagen (KG400, DIN276) | 1,43 | 7,04 | 0,41 | 1,72 | 8,54 | 1,91 |
| Gebäudebetrieb (gesamt) | -16,76 | -16,75 | -15,52 | -17,01 | -17,01 | -15,89 |
| aus vermiedener Wärmebereitstellung | -17,02 | -17,02 | -17,02 | -17,02 | -17,02 | -17,02 |
| aus Nutzung von Netzstrom (Strom konventionell) | -0,06 | -0,06 | 1,22 | -0,33 | -0,33 | 0,83 |
| aus Nutzung von Überschusstrom (bei Starkwind) | 0,33 | 0,33 | 0,28 | 0,34 | 0,34 | 0,29 |
| Lebenszyklus (gesamt) | -14,29 | -8,68 | -14,07 | -14,26 | -7,44 | -12,94 |

| LH - SANIERUNG Ergebnisse Ökobilanz (vor DELTA-Bildung) Beitrag zum Treibhauspotenzial (GWP) in kg CO ₂ -Äquiv./ (m ² *a) | Windheizung 2.0-Konzept | | | | | | |
|---|-------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--------------|
| | GEG-Referenz | K1-WWS100 | K2-HTSS100 | K3-BTA-DE | K1_WWS120 | K2-HTSS120 | K3-BTA-DE-WA |
| Gebäudekonstruktion (gesamt) | 0,24 | 1,05 | 3,52 | 0,47 | 1,18 | 4,19 | 0,95 |
| aus konstruktivem Mehr-/Minderaufwand der Baukonstruktion (KG300, DIN276) | 0,00 | 0,19 | 0,19 | 0,19 | 0,19 | 0,19 | 0,19 |
| aus konstruktivem Mehr-/Minderaufwand der Technischen Anlagen (KG400, DIN276) | 0,24 | 0,86 | 3,34 | 0,28 | 0,99 | 4,00 | 0,77 |
| Gebäudebetrieb (gesamt) | 16,31 | 1,51 | 1,52 | 2,12 | 1,38 | 1,38 | 1,87 |
| aus vermiedener Wärmebereitstellung | 15,59 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| aus Nutzung von Netzstrom (Strom konventionell) | 0,73 | 1,18 | 1,19 | 1,83 | 1,03 | 1,04 | 1,56 |
| aus Nutzung von Überschusstrom (bei Starkwind) | 0,00 | 0,33 | 0,33 | 0,29 | 0,34 | 0,34 | 0,31 |
| Lebenszyklus (gesamt) | 16,55 | 2,56 | 5,04 | 2,59 | 2,55 | 5,57 | 2,82 |

| LH - SANIERUNG Ergebnisse Ökobilanz (DELTA) Beitrag zum Treibhauspotenzial (GWP) in kg CO ₂ -Äquiv./ (m ² *a) | Windheizung 2.0-Konzept | | | | | |
|---|-------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| | K1-WWS100 | K2-HTSS100 | K3-BTA-DE | K1_WWS120 | K2-HTSS120 | K3-BTA-DE-WA |
| Gebäudekonstruktion (gesamt) | 0,81 | 3,29 | 0,23 | 0,94 | 3,95 | 0,72 |
| aus konstruktivem Mehr-/Minderaufwand der Baukonstruktion (KG300, DIN276) | 0,19 | 0,19 | 0,19 | 0,19 | 0,19 | 0,19 |
| aus konstruktivem Mehr-/Minderaufwand der Technischen Anlagen (KG400, DIN276) | 0,63 | 3,10 | 0,04 | 0,75 | 3,76 | 0,53 |
| Gebäudebetrieb (gesamt) | -14,80 | -14,79 | -14,19 | -14,94 | -14,93 | -14,44 |
| aus vermiedener Wärmebereitstellung | -15,59 | -15,59 | -15,59 | -15,59 | -15,59 | -15,59 |
| aus Nutzung von Netzstrom (Strom konventionell) | 0,45 | 0,46 | 1,10 | 0,31 | 0,31 | 0,84 |
| aus Nutzung von Überschusstrom (bei Starkwind) | 0,33 | 0,33 | 0,29 | 0,34 | 0,34 | 0,31 |
| Lebenszyklus (gesamt) | -13,99 | -11,51 | -13,96 | -14,00 | -10,98 | -13,72 |

Tabelle 66:
 Detailergebnisse Ökobilanz GWP, Zwillingshaus (ZH), Neubau und Sanierung.

| ZH - NEUBAU Ergebnisse Ökobilanz (vor DELTA-Bildung) Beitrag zum Treibhauspotenzial (GWP) in kg CO ₂ -Äquiv./((m ² *a) | Windheizung 2.0-Konzept | | | | | | |
|--|-------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--------------|
| | GEG-Referenz | K1-WWS100 | K2-HTSS100 | K3-BTA-DE | K1_WWS120 | K2-HTSS120 | K3-BTA-DE-WA |
| Gebäudekonstruktion (gesamt) | 0,63 | 4,59 | 5,67 | 5,27 | 4,66 | 6,04 | 6,95 |
| aus konstruktivem Mehr-/Minderaufwand der Baukonstruktion (KG300, DIN276) | 0,00 | 3,73 | 3,73 | 3,73 | 3,73 | 3,73 | 3,73 |
| aus konstruktivem Mehr-/Minderaufwand der Technischen Anlagen (KG400, DIN276) | 0,63 | 0,86 | 1,93 | 1,54 | 0,93 | 2,30 | 3,22 |
| Gebäudebetrieb (gesamt) | 21,51 | 1,32 | 1,35 | 0,56 | 0,98 | 0,99 | 0,35 |
| aus vermiedener Wärmebereitstellung | 20,04 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| aus Nutzung von Netzstrom (Strom konventionell) | 1,47 | 1,03 | 1,06 | 0,24 | 0,67 | 0,68 | 0,02 |
| aus Nutzung von Überschussstrom (bei Starkwind) | 0,00 | 0,29 | 0,29 | 0,33 | 0,31 | 0,31 | 0,33 |
| Lebenszyklus (gesamt) | 22,14 | 5,92 | 7,02 | 5,83 | 5,64 | 7,03 | 7,30 |

| ZH - NEUBAU Ergebnisse Ökobilanz (DELTA) Beitrag zum Treibhauspotenzial (GWP) in kg CO ₂ -Äquiv./((m ² *a) | Windheizung 2.0-Konzept | | | | | |
|--|-------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| | K1-WWS100 | K2-HTSS100 | K3-BTA-DE | K1_WWS120 | K2-HTSS120 | K3-BTA-DE-WA |
| Gebäudekonstruktion (gesamt) | 3,96 | 5,03 | 4,63 | 4,03 | 5,40 | 6,32 |
| aus konstruktivem Mehr-/Minderaufwand der Baukonstruktion (KG300, DIN276) | 3,73 | 3,73 | 3,73 | 3,73 | 3,73 | 3,73 |
| aus konstruktivem Mehr-/Minderaufwand der Technischen Anlagen (KG400, DIN276) | 0,22 | 1,30 | 0,90 | 0,30 | 1,67 | 2,59 |
| Gebäudebetrieb (gesamt) | -20,18 | -20,16 | -20,95 | -20,53 | -20,52 | -21,16 |
| aus vermiedener Wärmebereitstellung | -20,04 | -20,04 | -20,04 | -20,04 | -20,04 | -20,04 |
| aus Nutzung von Netzstrom (Strom konventionell) | -0,44 | -0,42 | -1,23 | -0,80 | -0,79 | -1,46 |
| aus Nutzung von Überschussstrom (bei Starkwind) | 0,29 | 0,29 | 0,33 | 0,31 | 0,31 | 0,33 |
| Lebenszyklus (gesamt) | -16,23 | -15,13 | -16,31 | -16,50 | -15,11 | -14,84 |

| ZH - SANIERUNG Ergebnisse Ökobilanz (vor DELTA-Bildung) Beitrag zum Treibhauspotenzial (GWP) in kg CO ₂ -Äquiv./((m ² *a) | Windheizung 2.0-Konzept | | | | | | |
|---|-------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--------------|
| | GEG-Referenz | K1-WWS100 | K2-HTSS100 | K3-BTA-DE | K1_WWS120 | K2-HTSS120 | K3-BTA-DE-WA |
| Gebäudekonstruktion (gesamt) | 0,32 | 1,55 | 2,28 | 1,48 | 1,60 | 2,51 | 1,48 |
| aus konstruktivem Mehr-/Minderaufwand der Baukonstruktion (KG300, DIN276) | 0,00 | 1,09 | 1,09 | 1,09 | 1,09 | 1,09 | 1,09 |
| aus konstruktivem Mehr-/Minderaufwand der Technischen Anlagen (KG400, DIN276) | 0,32 | 0,46 | 1,19 | 0,39 | 0,51 | 1,42 | 0,39 |
| Gebäudebetrieb (gesamt) | 13,35 | 1,63 | 1,62 | 1,36 | 1,41 | 1,40 | 0,75 |
| aus vermiedener Wärmebereitstellung | 12,75 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| aus Nutzung von Netzstrom (Strom konventionell) | 0,60 | 1,28 | 1,27 | 0,98 | 1,04 | 1,03 | 0,34 |
| aus Nutzung von Überschussstrom (bei Starkwind) | 0,00 | 0,36 | 0,36 | 0,38 | 0,37 | 0,37 | 0,42 |
| Lebenszyklus (gesamt) | 13,67 | 3,19 | 3,90 | 2,84 | 3,01 | 3,91 | 2,24 |

| ZH - SANIERUNG Ergebnisse Ökobilanz (DELTA) Beitrag zum Treibhauspotenzial (GWP) in kg CO ₂ -Äquiv./((m ² *a) | Windheizung 2.0-Konzept | | | | | |
|---|-------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| | K1-WWS100 | K2-HTSS100 | K3-BTA-DE | K1_WWS120 | K2-HTSS120 | K3-BTA-DE-WA |
| Gebäudekonstruktion (gesamt) | 1,24 | 1,96 | 1,17 | 1,28 | 2,19 | 1,17 |
| aus konstruktivem Mehr-/Minderaufwand der Baukonstruktion (KG300, DIN276) | 1,09 | 1,09 | 1,09 | 1,09 | 1,09 | 1,09 |
| aus konstruktivem Mehr-/Minderaufwand der Technischen Anlagen (KG400, DIN276) | 0,15 | 0,87 | 0,08 | 0,19 | 1,10 | 0,08 |
| Gebäudebetrieb (gesamt) | -11,72 | -11,73 | -11,99 | -11,94 | -11,95 | -12,60 |
| aus vermiedener Wärmebereitstellung | -12,75 | -12,75 | -12,75 | -12,75 | -12,75 | -12,75 |
| aus Nutzung von Netzstrom (Strom konventionell) | 0,68 | 0,67 | 0,39 | 0,45 | 0,43 | -0,26 |
| aus Nutzung von Überschussstrom (bei Starkwind) | 0,36 | 0,36 | 0,38 | 0,37 | 0,37 | 0,42 |
| Lebenszyklus (gesamt) | -10,48 | -9,77 | -10,83 | -10,66 | -9,76 | -11,43 |

Tabelle 67:
 Detailergebnisse Ökobilanz GWP, Reihenhaus J (RH J), Neubau und Sanierung.

| RH J - NEUBAU Ergebnisse Ökobilanz (vor DELTA-Bildung) Beitrag zum Treibhauspotenzial (GWP) in kg CO ₂ -Äquiv./m ² a | Windheizung 2.0-Konzept | | | | | | |
|--|-------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--------------|
| | GEG-Referenz | K1-WWS100 | K2-HTSS100 | K3-BTA-DE | K1_WWS120 | K2-HTSS120 | K3-BTA-DE-WA |
| Gebäudekonstruktion (gesamt) | 0,63 | 2,60 | 4,80 | 2,59 | 2,72 | 5,44 | 3,73 |
| aus konstruktivem Mehr-/Minderaufwand der Baukonstruktion (KG300, DIN276) | 0,00 | 1,49 | 1,49 | 1,49 | 1,49 | 1,49 | 1,49 |
| aus konstruktivem Mehr-/Minderaufwand der Technischen Anlagen (KG400, DIN276) | 0,63 | 1,12 | 3,32 | 1,11 | 1,24 | 3,96 | 2,24 |
| Gebäudebetrieb (gesamt) | 23,05 | 1,99 | 1,96 | 2,90 | 1,53 | 1,51 | 2,25 |
| aus vermiedener Wärmebereitstellung | 21,47 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| aus Nutzung von Netzstrom (Strom konventionell) | 1,58 | 1,56 | 1,52 | 2,51 | 1,08 | 1,05 | 1,83 |
| aus Nutzung von Überschusstrom (bei Starkwind) | 0,00 | 0,43 | 0,44 | 0,39 | 0,45 | 0,45 | 0,41 |
| Lebenszyklus (gesamt) | 23,68 | 4,59 | 6,76 | 5,49 | 4,26 | 6,95 | 5,98 |

| RH J - NEUBAU Ergebnisse Ökobilanz (DELTA) Beitrag zum Treibhauspotenzial (GWP) in kg CO ₂ -Äquiv./m ² a | Windheizung 2.0-Konzept | | | | | |
|--|-------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| | K1-WWS100 | K2-HTSS100 | K3-BTA-DE | K1_WWS120 | K2-HTSS120 | K3-BTA-DE-WA |
| Gebäudekonstruktion (gesamt) | 1,97 | 4,17 | 1,96 | 2,09 | 4,81 | 3,10 |
| aus konstruktivem Mehr-/Minderaufwand der Baukonstruktion (KG300, DIN276) | 1,49 | 1,49 | 1,49 | 1,49 | 1,49 | 1,49 |
| aus konstruktivem Mehr-/Minderaufwand der Technischen Anlagen (KG400, DIN276) | 0,48 | 2,68 | 0,47 | 0,61 | 3,33 | 1,61 |
| Gebäudebetrieb (gesamt) | -21,06 | -21,09 | -20,15 | -21,52 | -21,54 | -20,80 |
| aus vermiedener Wärmebereitstellung | -21,47 | -21,47 | -21,47 | -21,47 | -21,47 | -21,47 |
| aus Nutzung von Netzstrom (Strom konventionell) | -0,02 | -0,05 | 0,94 | -0,50 | -0,53 | 0,26 |
| aus Nutzung von Überschusstrom (bei Starkwind) | 0,43 | 0,44 | 0,39 | 0,45 | 0,45 | 0,41 |
| Lebenszyklus (gesamt) | -19,09 | -16,92 | -18,19 | -19,42 | -16,73 | -17,70 |

| RH J - SANIERUNG Ergebnisse Ökobilanz (vor DELTA-Bildung) Beitrag zum Treibhauspotenzial (GWP) in kg CO ₂ -Äquiv./m ² a | Windheizung 2.0-Konzept | | | | | | |
|---|-------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--------------|
| | GEG-Referenz | K1-WWS100 | K2-HTSS100 | K3-BTA-DE | K1_WWS120 | K2-HTSS120 | K3-BTA-DE-WA |
| Gebäudekonstruktion (gesamt) | 0,32 | 0,86 | 1,55 | 0,69 | 0,91 | 1,77 | 1,24 |
| aus konstruktivem Mehr-/Minderaufwand der Baukonstruktion (KG300, DIN276) | 0,00 | 0,40 | 0,40 | 0,40 | 0,40 | 0,40 | 0,40 |
| aus konstruktivem Mehr-/Minderaufwand der Technischen Anlagen (KG400, DIN276) | 0,32 | 0,47 | 1,15 | 0,29 | 0,51 | 1,38 | 0,85 |
| Gebäudebetrieb (gesamt) | 20,81 | 1,71 | 1,77 | 2,02 | 1,42 | 1,47 | 1,15 |
| aus vermiedener Wärmebereitstellung | 19,88 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| aus Nutzung von Netzstrom (Strom konventionell) | 0,93 | 1,32 | 1,39 | 1,65 | 1,01 | 1,07 | 0,72 |
| aus Nutzung von Überschusstrom (bei Starkwind) | 0,00 | 0,39 | 0,39 | 0,37 | 0,41 | 0,41 | 0,43 |
| Lebenszyklus (gesamt) | 21,13 | 2,58 | 3,32 | 2,71 | 2,33 | 3,25 | 2,39 |

| RH J - SANIERUNG Ergebnisse Ökobilanz (DELTA) Beitrag zum Treibhauspotenzial (GWP) in kg CO ₂ -Äquiv./m ² a | Windheizung 2.0-Konzept | | | | | |
|---|-------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| | K1-WWS100 | K2-HTSS100 | K3-BTA-DE | K1_WWS120 | K2-HTSS120 | K3-BTA-DE-WA |
| Gebäudekonstruktion (gesamt) | 0,55 | 1,23 | 0,37 | 0,59 | 1,46 | 0,93 |
| aus konstruktivem Mehr-/Minderaufwand der Baukonstruktion (KG300, DIN276) | 0,40 | 0,40 | 0,40 | 0,40 | 0,40 | 0,40 |
| aus konstruktivem Mehr-/Minderaufwand der Technischen Anlagen (KG400, DIN276) | 0,15 | 0,84 | -0,02 | 0,19 | 1,06 | 0,53 |
| Gebäudebetrieb (gesamt) | -19,10 | -19,04 | -18,79 | -19,39 | -19,34 | -19,66 |
| aus vermiedener Wärmebereitstellung | -19,88 | -19,88 | -19,88 | -19,88 | -19,88 | -19,88 |
| aus Nutzung von Netzstrom (Strom konventionell) | 0,39 | 0,46 | 0,72 | 0,08 | 0,14 | -0,21 |
| aus Nutzung von Überschusstrom (bei Starkwind) | 0,39 | 0,39 | 0,37 | 0,41 | 0,41 | 0,43 |
| Lebenszyklus (gesamt) | -18,55 | -17,81 | -18,42 | -18,80 | -17,88 | -18,74 |

A.7 Detailergebnisse Ökobilanz PENRT ausgewählter Windheizung 2.0-Konzepte

Tabelle 68:
Detailergebnisse Ökobilanz PENRT, Haus Leitershofen (LH), Neubau und Sanierung.

| LH - NEUBAU Ergebnisse Ökobilanz (vor DELTA-Bildung) Primärenergie, nicht erneuerbar, total (PENRT) in MJ/(m²*a) | Windheizung 2.0-Konzept | | | | | | |
|--|-------------------------|--------------|---------------|--------------|--------------|---------------|--------------|
| | GEG-Referenz | K1-WWS100 | K2-HTSS100 | K3-BTA-DE | K1_WWS120 | K2-HTSS120 | K3-BTA-DE-WA |
| Gebäudekonstruktion (gesamt) | 6,50 | 37,61 | 114,64 | 21,60 | 41,34 | 135,01 | 35,69 |
| aus konstruktivem Mehr-/Minderaufwand der Baukonstruktion (KG300, DIN276) | 0,00 | 12,30 | 12,30 | 12,30 | 12,30 | 12,30 | 12,30 |
| aus konstruktivem Mehr-/Minderaufwand der Technischen Anlagen (KG400, DIN276) | 6,50 | 25,31 | 102,33 | 9,30 | 29,04 | 122,70 | 23,38 |
| Gebäudebetrieb (gesamt) | 298,71 | 17,54 | 17,56 | 31,46 | 14,65 | 14,67 | 27,23 |
| aus vermiedener Wärmebereitstellung | 284,57 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| aus Nutzung von Netzstrom (Strom konventionell) | 14,13 | 13,41 | 13,43 | 27,98 | 10,39 | 10,41 | 23,55 |
| aus Nutzung von Überschussstrom (bei Starkwind) | 0,00 | 4,13 | 4,13 | 3,48 | 4,27 | 4,26 | 3,68 |
| Lebenszyklus (gesamt) | 305,21 | 55,15 | 132,20 | 53,07 | 56,00 | 149,68 | 62,92 |

| LH - NEUBAU Ergebnisse Ökobilanz (DELTA) Primärenergie, nicht erneuerbar, total (PENRT) in MJ/(m²*a) | Windheizung 2.0-Konzept | | | | | |
|--|-------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| | K1-WWS100 | K2-HTSS100 | K3-BTA-DE | K1_WWS120 | K2-HTSS120 | K3-BTA-DE-WA |
| Gebäudekonstruktion (gesamt) | 31,11 | 108,14 | 15,10 | 34,84 | 128,51 | 29,18 |
| aus konstruktivem Mehr-/Minderaufwand der Baukonstruktion (KG300, DIN276) | 12,30 | 12,30 | 12,30 | 12,30 | 12,30 | 12,30 |
| aus konstruktivem Mehr-/Minderaufwand der Technischen Anlagen (KG400, DIN276) | 18,80 | 95,83 | 2,80 | 22,54 | 116,20 | 16,88 |
| Gebäudebetrieb (gesamt) | -281,16 | -281,14 | -267,24 | -284,05 | -284,03 | -271,47 |
| aus vermiedener Wärmebereitstellung | -284,57 | -284,57 | -284,57 | -284,57 | -284,57 | -284,57 |
| aus Nutzung von Netzstrom (Strom konventionell) | -0,72 | -0,70 | 13,85 | -3,74 | -3,72 | 9,42 |
| aus Nutzung von Überschussstrom (bei Starkwind) | 4,13 | 4,13 | 3,48 | 4,27 | 4,26 | 3,68 |
| Lebenszyklus (gesamt) | -250,05 | -173,01 | -252,14 | -249,21 | -155,53 | -242,29 |

| LH - SANIERUNG Ergebnisse Ökobilanz (vor DELTA-Bildung) Primärenergie, nicht erneuerbar, total (PENRT) in MJ/(m²*a) | Windheizung 2.0-Konzept | | | | | | |
|---|-------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| | GEG-Referenz | K1-WWS100 | K2-HTSS100 | K3-BTA-DE | K1_WWS120 | K2-HTSS120 | K3-BTA-DE-WA |
| Gebäudekonstruktion (gesamt) | 3,25 | 13,67 | 47,27 | 4,61 | 15,31 | 56,27 | 9,24 |
| aus konstruktivem Mehr-/Minderaufwand der Baukonstruktion (KG300, DIN276) | 0,00 | 2,16 | 2,16 | 2,16 | 2,16 | 2,16 | 2,16 |
| aus konstruktivem Mehr-/Minderaufwand der Technischen Anlagen (KG400, DIN276) | 3,25 | 11,51 | 45,11 | 2,45 | 13,15 | 54,11 | 7,08 |
| Gebäudebetrieb (gesamt) | 269,31 | 18,36 | 18,42 | 25,61 | 16,71 | 16,78 | 22,65 |
| aus vermiedener Wärmebereitstellung | 260,56 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| aus Nutzung von Netzstrom (Strom konventionell) | 8,74 | 14,20 | 14,27 | 21,96 | 12,43 | 12,51 | 18,79 |
| aus Nutzung von Überschussstrom (bei Starkwind) | 0,00 | 4,16 | 4,16 | 3,65 | 4,28 | 4,27 | 3,86 |
| Lebenszyklus (gesamt) | 272,56 | 32,03 | 65,70 | 30,22 | 32,02 | 73,06 | 31,89 |

| LH - SANIERUNG Ergebnisse Ökobilanz (DELTA) Primärenergie, nicht erneuerbar, total (PENRT) in MJ/(m²*a) | Windheizung 2.0-Konzept | | | | | |
|---|-------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| | K1-WWS100 | K2-HTSS100 | K3-BTA-DE | K1_WWS120 | K2-HTSS120 | K3-BTA-DE-WA |
| Gebäudekonstruktion (gesamt) | 10,42 | 44,02 | 1,36 | 12,06 | 53,02 | 5,99 |
| aus konstruktivem Mehr-/Minderaufwand der Baukonstruktion (KG300, DIN276) | 2,16 | 2,16 | 2,16 | 2,16 | 2,16 | 2,16 |
| aus konstruktivem Mehr-/Minderaufwand der Technischen Anlagen (KG400, DIN276) | 8,26 | 41,86 | -0,80 | 9,90 | 50,86 | 3,83 |
| Gebäudebetrieb (gesamt) | -250,94 | -250,88 | -243,70 | -252,59 | -252,52 | -246,66 |
| aus vermiedener Wärmebereitstellung | -260,56 | -260,56 | -260,56 | -260,56 | -260,56 | -260,56 |
| aus Nutzung von Netzstrom (Strom konventionell) | 5,46 | 5,52 | 13,22 | 3,69 | 3,77 | 10,05 |
| aus Nutzung von Überschussstrom (bei Starkwind) | 4,16 | 4,16 | 3,65 | 4,28 | 4,27 | 3,86 |
| Lebenszyklus (gesamt) | -240,52 | -206,86 | -242,34 | -240,54 | -199,50 | -240,67 |

Tabelle 69:
 Detailergebnisse Ökobilanz PENRT, Zwillingshaus (ZH), Neubau und Sanierung.

| ZH - NEUBAU Ergebnisse Ökobilanz (vor DELTA-Bildung) Primärenergie, nicht erneuerbar, total (PENRT) in MJ/(m²*a) | Windheizung 2.0-Konzept | | | | | | |
|--|-------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| | GEG-Referenz | K1-WWS100 | K2-HTSS100 | K3-BTA-DE | K1_WWS120 | K2-HTSS120 | K3-BTA-DE-WA |
| Gebäudekonstruktion (gesamt) | 8,67 | 57,55 | 71,93 | 62,10 | 58,47 | 76,96 | 77,85 |
| aus konstruktivem Mehr-/Minderaufwand der Baukonstruktion (KG300, DIN276) | 0,00 | 45,69 | 45,69 | 45,69 | 45,69 | 45,69 | 45,69 |
| aus konstruktivem Mehr-/Minderaufwand der Technischen Anlagen (KG400, DIN276) | 8,67 | 11,86 | 26,24 | 16,40 | 12,78 | 31,27 | 32,16 |
| Gebäudebetrieb (gesamt) | 351,64 | 15,34 | 15,62 | 6,76 | 11,49 | 11,61 | 4,38 |
| aus vermiedener Wärmebereitstellung | 335,01 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| aus Nutzung von Netzstrom (Strom konventionell) | 16,64 | 11,65 | 11,94 | 2,67 | 7,62 | 7,74 | 0,18 |
| aus Nutzung von Überschussstrom (bei Starkwind) | 0,00 | 3,69 | 3,68 | 4,09 | 3,87 | 3,86 | 4,20 |
| Lebenszyklus (gesamt) | 360,31 | 72,89 | 87,55 | 68,86 | 69,96 | 88,57 | 82,23 |

| ZH - NEUBAU Ergebnisse Ökobilanz (DELTA) Primärenergie, nicht erneuerbar, total (PENRT) in MJ/(m²*a) | Windheizung 2.0-Konzept | | | | | |
|--|-------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| | K1-WWS100 | K2-HTSS100 | K3-BTA-DE | K1_WWS120 | K2-HTSS120 | K3-BTA-DE-WA |
| Gebäudekonstruktion (gesamt) | 48,88 | 63,26 | 53,42 | 49,80 | 68,29 | 69,18 |
| aus konstruktivem Mehr-/Minderaufwand der Baukonstruktion (KG300, DIN276) | 45,69 | 45,69 | 45,69 | 45,69 | 45,69 | 45,69 |
| aus konstruktivem Mehr-/Minderaufwand der Technischen Anlagen (KG400, DIN276) | 3,19 | 17,57 | 7,73 | 4,11 | 22,60 | 23,48 |
| Gebäudebetrieb (gesamt) | -336,30 | -336,03 | -344,88 | -340,14 | -340,03 | -347,25 |
| aus vermiedener Wärmebereitstellung | -335,01 | -335,01 | -335,01 | -335,00 | -335,00 | -335,00 |
| aus Nutzung von Netzstrom (Strom konventionell) | -4,98 | -4,69 | -13,96 | -9,01 | -8,89 | -16,45 |
| aus Nutzung von Überschussstrom (bei Starkwind) | 3,69 | 3,68 | 4,09 | 3,87 | 3,86 | 4,20 |
| Lebenszyklus (gesamt) | -287,42 | -272,76 | -291,45 | -290,34 | -271,74 | -278,07 |

| ZH - SANIERUNG Ergebnisse Ökobilanz (vor DELTA-Bildung) Primärenergie, nicht erneuerbar, total (PENRT) in MJ/(m²*a) | Windheizung 2.0-Konzept | | | | | | |
|---|-------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| | GEG-Referenz | K1-WWS100 | K2-HTSS100 | K3-BTA-DE | K1_WWS120 | K2-HTSS120 | K3-BTA-DE-WA |
| Gebäudekonstruktion (gesamt) | 4,34 | 18,85 | 28,49 | 16,10 | 19,40 | 31,60 | 16,10 |
| aus konstruktivem Mehr-/Minderaufwand der Baukonstruktion (KG300, DIN276) | 0,00 | 12,47 | 12,47 | 12,47 | 12,47 | 12,47 | 12,47 |
| aus konstruktivem Mehr-/Minderaufwand der Technischen Anlagen (KG400, DIN276) | 4,34 | 6,38 | 16,02 | 3,63 | 6,93 | 19,13 | 3,63 |
| Gebäudebetrieb (gesamt) | 220,38 | 19,82 | 19,69 | 16,51 | 17,17 | 17,00 | 9,27 |
| aus vermiedener Wärmebereitstellung | 213,22 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| aus Nutzung von Netzstrom (Strom konventionell) | 7,16 | 15,34 | 15,20 | 11,79 | 12,50 | 12,32 | 4,04 |
| aus Nutzung von Überschussstrom (bei Starkwind) | 0,00 | 4,48 | 4,49 | 4,72 | 4,67 | 4,68 | 5,24 |
| Lebenszyklus (gesamt) | 224,72 | 38,67 | 48,18 | 32,61 | 36,57 | 48,60 | 25,37 |

| ZH - SANIERUNG Ergebnisse Ökobilanz (DELTA) Primärenergie, nicht erneuerbar, total (PENRT) in MJ/(m²*a) | Windheizung 2.0-Konzept | | | | | |
|---|-------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| | K1-WWS100 | K2-HTSS100 | K3-BTA-DE | K1_WWS120 | K2-HTSS120 | K3-BTA-DE-WA |
| Gebäudekonstruktion (gesamt) | 14,51 | 24,16 | 11,76 | 15,06 | 27,27 | 11,76 |
| aus konstruktivem Mehr-/Minderaufwand der Baukonstruktion (KG300, DIN276) | 12,47 | 12,47 | 12,47 | 12,47 | 12,47 | 12,47 |
| aus konstruktivem Mehr-/Minderaufwand der Technischen Anlagen (KG400, DIN276) | 2,04 | 11,68 | -0,71 | 2,59 | 14,79 | -0,71 |
| Gebäudebetrieb (gesamt) | -200,56 | -200,69 | -203,87 | -203,21 | -203,38 | -211,11 |
| aus vermiedener Wärmebereitstellung | -213,22 | -213,22 | -213,22 | -213,22 | -213,22 | -213,22 |
| aus Nutzung von Netzstrom (Strom konventionell) | 8,19 | 8,05 | 4,64 | 5,35 | 5,16 | -3,12 |
| aus Nutzung von Überschussstrom (bei Starkwind) | 4,48 | 4,49 | 4,72 | 4,67 | 4,68 | 5,24 |
| Lebenszyklus (gesamt) | -186,04 | -176,53 | -192,11 | -188,14 | -176,11 | -199,34 |

Tabelle 70:
 Detailergebnisse Ökobilanz PENRT, Reihenhaus J (RH J), Neubau und Sanierung.

| RH J - NEUBAU Ergebnisse Ökobilanz (vor DELTA-Bildung) Primärenergie, nicht erneuerbar, total (PENRT) in MJ/(m²*a) | Windheizung 2.0-Konzept | | | | | | |
|--|-------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| | GEG-Referenz | K1-WWS100 | K2-HTSS100 | K3-BTA-DE | K1_WWS120 | K2-HTSS120 | K3-BTA-DE-WA |
| Gebäudekonstruktion (gesamt) | 8,66 | 32,96 | 62,85 | 29,71 | 34,54 | 71,61 | 40,35 |
| aus konstruktivem Mehr-/Minderaufwand der Baukonstruktion (KG300, DIN276) | 0,00 | 17,79 | 17,79 | 17,79 | 17,79 | 17,79 | 17,79 |
| aus konstruktivem Mehr-/Minderaufwand der Technischen Anlagen (KG400, DIN276) | 8,66 | 15,17 | 45,06 | 11,93 | 16,76 | 53,83 | 22,56 |
| Gebäudebetrieb (gesamt) | 376,80 | 23,05 | 22,70 | 33,25 | 17,89 | 17,59 | 25,92 |
| aus vermiedener Wärmebereitstellung | 358,97 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| aus Nutzung von Netzstrom (Strom konventionell) | 17,83 | 17,61 | 17,24 | 28,41 | 12,20 | 11,89 | 20,74 |
| aus Nutzung von Überschussstrom (bei Starkwind) | 0,00 | 5,44 | 5,46 | 4,83 | 5,69 | 5,70 | 5,18 |
| Lebenszyklus (gesamt) | 385,46 | 56,01 | 85,54 | 62,96 | 52,43 | 89,20 | 66,27 |

| RH J - NEUBAU Ergebnisse Ökobilanz (DELTA) Primärenergie, nicht erneuerbar, total (PENRT) in MJ/(m²*a) | Windheizung 2.0-Konzept | | | | | |
|--|-------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| | K1-WWS100 | K2-HTSS100 | K3-BTA-DE | K1_WWS120 | K2-HTSS120 | K3-BTA-DE-WA |
| Gebäudekonstruktion (gesamt) | 24,30 | 54,19 | 21,06 | 25,89 | 62,95 | 31,69 |
| aus konstruktivem Mehr-/Minderaufwand der Baukonstruktion (KG300, DIN276) | 17,79 | 17,79 | 17,79 | 17,79 | 17,79 | 17,79 |
| aus konstruktivem Mehr-/Minderaufwand der Technischen Anlagen (KG400, DIN276) | 6,51 | 36,40 | 3,27 | 8,10 | 45,17 | 13,90 |
| Gebäudebetrieb (gesamt) | -353,75 | -354,10 | -343,55 | -358,91 | -359,21 | -350,88 |
| aus vermiedener Wärmebereitstellung | -358,97 | -358,97 | -358,97 | -358,97 | -358,97 | -358,97 |
| aus Nutzung von Netzstrom (Strom konventionell) | -0,22 | -0,59 | 10,59 | -5,62 | -5,94 | 2,91 |
| aus Nutzung von Überschussstrom (bei Starkwind) | 5,44 | 5,46 | 4,83 | 5,69 | 5,70 | 5,18 |
| Lebenszyklus (gesamt) | -329,45 | -299,91 | -322,50 | -333,02 | -296,26 | -319,19 |

| RH J - SANIERUNG Ergebnisse Ökobilanz (vor DELTA-Bildung) Primärenergie, nicht erneuerbar, total (PENRT) in MJ/(m²*a) | Windheizung 2.0-Konzept | | | | | | |
|---|-------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| | GEG-Referenz | K1-WWS100 | K2-HTSS100 | K3-BTA-DE | K1_WWS120 | K2-HTSS120 | K3-BTA-DE-WA |
| Gebäudekonstruktion (gesamt) | 4,33 | 10,97 | 20,08 | 7,35 | 11,53 | 23,11 | 12,60 |
| aus konstruktivem Mehr-/Minderaufwand der Baukonstruktion (KG300, DIN276) | 0,00 | 4,55 | 4,55 | 4,55 | 4,55 | 4,55 | 4,55 |
| aus konstruktivem Mehr-/Minderaufwand der Technischen Anlagen (KG400, DIN276) | 4,33 | 6,43 | 15,54 | 2,81 | 6,99 | 18,56 | 8,05 |
| Gebäudebetrieb (gesamt) | 343,55 | 20,79 | 21,49 | 24,41 | 17,31 | 17,92 | 14,00 |
| aus vermiedener Wärmebereitstellung | 332,39 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| aus Nutzung von Netzstrom (Strom konventionell) | 11,15 | 15,89 | 16,64 | 19,77 | 12,16 | 12,82 | 8,61 |
| aus Nutzung von Überschussstrom (bei Starkwind) | 0,00 | 4,90 | 4,85 | 4,64 | 5,15 | 5,10 | 5,39 |
| Lebenszyklus (gesamt) | 347,88 | 31,77 | 41,57 | 31,77 | 28,85 | 41,03 | 26,59 |

| RH J - SANIERUNG Ergebnisse Ökobilanz (DELTA) Primärenergie, nicht erneuerbar, total (PENRT) in MJ/(m²*a) | Windheizung 2.0-Konzept | | | | | |
|---|-------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| | K1-WWS100 | K2-HTSS100 | K3-BTA-DE | K1_WWS120 | K2-HTSS120 | K3-BTA-DE-WA |
| Gebäudekonstruktion (gesamt) | 6,64 | 15,75 | 3,02 | 7,21 | 18,78 | 8,27 |
| aus konstruktivem Mehr-/Minderaufwand der Baukonstruktion (KG300, DIN276) | 4,55 | 4,55 | 4,55 | 4,55 | 4,55 | 4,55 |
| aus konstruktivem Mehr-/Minderaufwand der Technischen Anlagen (KG400, DIN276) | 2,10 | 11,21 | -1,52 | 2,66 | 14,23 | 3,72 |
| Gebäudebetrieb (gesamt) | -322,75 | -322,06 | -319,13 | -326,23 | -325,63 | -329,55 |
| aus vermiedener Wärmebereitstellung | -332,39 | -332,39 | -332,39 | -332,39 | -332,39 | -332,39 |
| aus Nutzung von Netzstrom (Strom konventionell) | 4,74 | 5,49 | 8,62 | 1,01 | 1,66 | -2,54 |
| aus Nutzung von Überschussstrom (bei Starkwind) | 4,90 | 4,85 | 4,64 | 5,15 | 5,10 | 5,39 |
| Lebenszyklus (gesamt) | -316,11 | -306,30 | -316,11 | -319,03 | -306,85 | -321,28 |