

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Abschlussbericht EnOB: BUILD-DIGITIZED - IoT und BIM für die Inbetriebnahme und den Betrieb von netzdienlichen Niedrigstenergiegebäuden

Laufzeit des Vorhabens:

01.07.2020 - 30.06.2023



FKZ: 03EN1021A
Hochschule Offenburg
Institut für nachhaltige
Energiesysteme
Badstraße 24 | 77652 Offenburg



FKZ: 03EN1021B
Fraunhofer-Institut für Solare
Energiesysteme ISE
Heidenhofstraße 2 | 79110
Freiburg



FKZ: 03EN1021C
Konzmann Gebäudetechnik
GmbH
Niederwiesenstraße 34 | 78050
VS-Villingen



FKZ: 03EN1021D
mondas GmbH
Emmy-Noether-Str. 2 | 79110
Freiburg



FKZ: 03EN1021E
Maurer Energie- und
Ingenieurleistungen GmbH
Dr.-Kurt-Steim-Strasse 7 | 78713
Schramberg-Sulgen



FKZ: 03EN1021F
Testo SE & Co. KgaA
Testo-Straße 1 | 79853
Lenzkirch

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

Inhalt

Zusammenfassung	4
1 Projektkurzbeschreibung.....	4
1.1 Projektpartner	5
1.2 Das Bauobjekt.....	6
1.2.1 Bauherr.....	6
1.2.2 Baubeschreibung und Gebäudekenndaten	6
1.3 Energiekonzept des RIZ Energie.....	7
2 Digitale Zwillinge des RIZ Energie.....	9
2.1 BIM-Modell.....	9
2.2 Methode zur Parametrisierung eines Simulationsmodells mit einem BIM-Modell	10
2.3 Gebäude- und Anlagensimulation	13
3 AP1: BIM-basierte Algorithmen zur Unterstützung der Inbetriebnahme von technischen Anlagen (Fraunhofer ISE).....	19
3.1 MoTive	19
3.1.1 Vorarbeiten	19
3.1.2 MoTive: Web-basiertes Werkzeug für das Technische Monitoring	19
3.1.3 MoTive – Anwendungsbeispiele	22
3.1.4 MoTive – Alternative Datenquellen	26
3.1.5 MoTive – Zusammenfassung und Fazit	30
3.2 Fehlererkennung bei der Inbetriebnahme.....	31
3.2.1 Manuelle Fehlererkennung.....	32
3.2.2 Regelbasierte Fehlererkennung.....	39
3.2.3 Modellbasierte Fehlererkennung.....	43
4 AP2: Strukturdaten, Gebäudeleittechnik (GLT) und Monitoringkonzept (Mondas GmbH)	50
4.1 Messkonzept des RIZ Energie.....	50
4.2 Monitoringplattform: mondas IoT	52
4.3 Metadatenstruktur	53
5 AP3: Gebäudemonitoring und Datenanalyse (Hochschule Offenburg)	55
5.1 Datenflussbild des Projekts	55
5.2 Monitoring Aufbereitung.....	56
5.3 Strukturierte Datenabfragen.....	57

6	AP4, AP5 und AP6: Inbetriebnahme des RIZ Energie (Hochschule Offenburg)	60
7	AP7: Energieeffizienz (Konzmann Gebäudetechnik GmbH)	62
7.1	Energiedatenanalyse.....	62
7.2	Evaluation der Energieeffizienz im RIZ-Gebäude.....	63
7.3	Energieflussbild nach DIN 18599.....	69
7.4	Einordnung der Performance des RIZ Energie	70
7.5	Energieeinsparmaßnahmen	72
7.5.1	Maßnahmen	73
7.5.2	Bewertung	74
8	AP8: Arbeitsplatzqualität (Testo SE & Co. KGaA)	75
8.1	Raumluftqualitäts- und Komfortmessungen	75
8.2	Beurteilung der Arbeitsplatzqualität auf Basis neuer IAQ-Messgrößen.....	80
9	AP9: Netzdienlichkeit (Maurer Energie- und Ingenieurleistungen GmbH & Co. KG)	83
9.1	Netzdienlicher Betrieb von Wärmepumpen durch modellprädiktive Regelung.....	83
9.1.1	Entwicklung des modellprädiktiven Reglers	83
9.1.2	Umsetzung in dem Heizsystem des RIZ Energie	85
10	Betriebsbegleitende Optimierung	92
10.1	Optimierung des Betriebes von thermoaktiven Bauteilsystemen (TABS) mit simulationsgestützten und prädiktiven Steuerungsalgorithmen	92
10.1.1	Anwendung des Unknown-But-Bounded (UBB)-Verfahrens im RIZ Energie	93
10.1.2	Prädiktive TABS-Steuerung im RIZ Energie mit multipler linearer Regression (MLR) ...	104
10.2	Optimierung bei Übergangsbetrieb	114
11	Projektmitarbeiter und Mitwirkende	117
12	Außenwirkung	117
12.1	Veröffentlichungen	117
12.2	Workshops	118
13	Fazit und Ausblick	119
14	Literaturverzeichnis	121
15	Anhang	124

Zusammenfassung

Die Baubranche setzt sich seit mehreren Jahren mit dem Building Information Modeling (kurz BIM) auseinander. Während diese Methode in Architekturbüros vermehrt zur optimierten Planung eingesetzt wird, halten BIM-Methoden nur langsam Einzug in die TGA-Planung, die Ausführung und in die Betriebsphase von Gebäuden. Dieses Projekt entwickelt BIM-Methoden für die Inbetriebnahme und betriebsbegleitende Optimierung von TGA-Anlagen und demonstriert diese an einem Niedrigstenergiegebäude. Damit gibt das Projekt einen Impuls zur breiten Anwendung von BIM-Methoden von der Entwurfsplanung über die Ausführung bis hin zur Inbetriebnahme. So können BIM-Methoden zielgerichtet genutzt werden, um Arbeitsplatzqualität und Energieeffizienz deutlich zu verbessern.

Diese Digitalisierung verändert die traditionelle Inbetriebnahme und Betriebsführung. Das einzelne Gebäude kann dabei zur zentralen Schnittstelle für die Erprobung und Umsetzungen digitaler Angebote werden und damit einen Beitrag zum effizienteren Energieverbrauch, sowie zum Klimaschutz leisten.

1 Projektkurzbeschreibung

In diesem Forschungsprojekt sollen BIM-Methoden zunächst auf die Inbetriebnahme und im weiteren Verlauf auf die Betriebsführung hocheffizienter Gebäude angewendet werden. Dabei sind diese Methoden nicht das eigentliche Forschungsziel. Es geht vielmehr um deren Anpassung und Anwendung auf Automatisierung, Inbetriebnahme und Betriebsüberwachung.

Das Regionale Innovationszentrum für Energietechnik, auch bekannt als RIZ Energie (siehe Abbildung 1), ist integraler Bestandteil des Haupt-Campus' der Hochschule Offenburg. Es wird als komplexes Energieverbundsystem mit seinem betriebsbedingten Energieverbrauch, seiner solaren Energiebereitstellung sowie den elektrischen und thermischen Energiespeicher als Teil des lokalen Energieversorgungssystems behandelt. Weiterhin wird es mit seinem netzdienlichen Betrieb in das lokale Stromversorgungsnetz der Stadt Offenburg eingebunden. Dafür kommen modellprädiktive Betriebsstrategien zum Einsatz, die diese dezentrale Struktur im Sinne eines Bottom-Up-Ansatzes in das übergeordnete Energiesystem einbinden. BIM-Methoden bieten hierfür eine hervorragend geeignete Datenstruktur und einheitliches Datenmanagement für die Informationen, die für die Entwicklung modellprädiktive Regler notwendig sind.

Menschen verbringen einen Großteil ihrer Zeit in Gebäuden und können über lange Zeiträume Schadstoffen, die sich in der Raumluft befinden, ausgesetzt sein. Raumluftparameter wie Temperatur, relative Feuchte, und Kohlenstoffdioxidkonzentration werden heute in modernen Gebäuden oft erfasst und als Regelgröße verwendet, um ein behagliches Raumklima zu gewährleisten. Hingegen werden leicht flüchtige organische Substanzen (VOC, Carbonylverbindungen) und Feinpartikel in der Raumluft in den meisten Fällen nicht gemessen, oder dann nur mit sehr unspezifischen Sensoren, die keine präzise Charakterisierung der vorhandenen Schadstoffzusammensetzung und -konzentrationen ermöglichen. Weiterhin fehlen zurzeit standardisierte Methoden, um VOC- und Feinpartikelkonzentrationen in der Raumluft zu quantifizieren und zu bewerten. Um diese Probleme zu adressieren, wird im Rahmen dieses Vorhabens eine neuartige Messtechnik für die Erfassung von VOCs und Feinpartikel im Projekt entwickelt und diese in Laboren und einzelnen Zonen des Gebäudes installiert und getestet.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass es das Ziel dieses Vorhabens ist, die im Gebäude vorhandenen Betriebsdaten ohne Installation zusätzlicher Messtechnik zu nutzen, um einerseits die komplexen Anforderungen an die Betriebsführung netzdienlicher Gebäude erfüllen zu können (insb. ausgeglichene Energiebilanz, proaktiver Ausgleich von Lastschwankungen im Stromnetz und komponentenschonender Betrieb unter Berücksichtigung von Luftqualität, visuellem und thermischem Komfort). Andererseits können BIM-Methoden in der Inbetriebnahmephase eines Gebäudes im ersten Betriebsjahr erfolgversprechend eingesetzt werden, um die vorliegende Information aus der Planungs- und Bauphase systematisch und in digitaler Form zu erfassen und diese für die Optimierung des Anlagenbetriebs betriebsbegleitend zu nutzen.



Abbildung 1 RIZ Energie Gebäude in Offenburg. Ansicht von Süd-Ost.

1.1 Projektpartner

An dem Projekt sind 6 Projektpartner beteiligt. Zwei Forschungseinrichtungen: Das Institut für Nachhaltige Energiesysteme (INES) der Hochschule Offenburg als Projektkoordinator und das Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme (ISE), sowie drei Unternehmen: Testo SE & Co. KGaA, Konzmann Gebäudetechnik GmbH und Maurer Energie- und Ingenieurleistungen GmbH. Das Projekt ist in 9 Arbeitspakete unterteilt, deren Schwerpunkte im Folgenden zusammengefasst werden:

Fraunhofer - ISE: (AP1)

- Entwicklung eines Algorithmus (MoTive) auf Basis von BIM-Methoden zur Unterstützung der Inbetriebnahmephase der technischen Gebäudeausrüstung.

mondas GmbH: (AP2)

- Entwicklung eines Metadatenkonzepts
- Webinterface für das technische Monitoring (TMon) – Echtzeit-Messdaten
- Schnittstelle zum automatischen Auslesen von Daten aus BMS- und IFC-Dateien (Strukturdaten - BIM)

Hochschule Offenburg - INES: (AP3, AP4, AP5, AP6)

- Projektleitung und Koordination
- Gestaltung eines Gebäudemonitorings unter ausschließlicher Nutzung der Daten aus der zentralen Gebäudeleittechnik entsprechend eines vereinbarten BIM-Standards.
- Inbetriebnahme der RIZ Energie-Gebäude und energieverbundenen Sub-Systemen für einen netzdienlichen Betrieb von regenerativen Energieerzeugern unter Berücksichtigung von thermischen und elektrischen Energiespeichern.

Konzmann Gebäudetechnik GmbH (AP7)

- Anwendung eingeführter Bilanzmethoden und dynamischer Verfahren zur Evaluation der Energieeffizienz im Gebäude unter Berücksichtigung seiner Einbindung in ein übergeordnetes Energieverbundsystem und mit der Nutzung eines digitalen Zwillings.

Testo SE & Co. KgaA (AP8)

- Entwicklung und algorithmische Implementierung einer Methodik zur Bewertung der Konzentrationen von VOC und Feinpartikeln in der Raumluft.

Maurer Energie- und Ingenieurleistungen GmbH (AP9)

- Dynamische, energiewirtschaftliche Bewertung der Netzdienlichkeit des Gebäudebetriebs in einem übergeordneten Energieverbundsystem mit Hilfe eines digitalen Zwillings.

1.2 Das Bauobjekt

Am RIZ Energie wird die Forschung in der Querschnittstechnologie Energie/Umwelt in den Bereichen Maschinenbau und Verfahrenstechnik, Elektro- und Informationstechnik, Mechatronik und Energiesystemtechnik mit folgenden Themenschwerpunkten gebündelt: Ressourceneffizienz in der Produktentwicklung, Gebäudesystemtechnik, Bauphysik und Gebäude, Management von Energiesystemen, Smart-Grid Technologie, elektrische Speichersysteme, solarthermische Systeme, Wasserstofftechnik, Gasanalytik, Biomasse, Strömungsmechanik und energieeffiziente Antriebskonzepte, sowie numerische Simulationsverfahren in diesen Themengebieten. Hier wird die Energieforschung der Hochschule Offenburg konzentriert und eine Forschung und Entwicklungs (FuE)-Plattform für die regionale Wirtschaft im Bereich der angewandten Energieforschung bereitgestellt.

Damit bietet das RIZ Energie ideale Voraussetzungen, einerseits die Energieflüsse und die Arbeitsplatzqualität in einem netzdienlichen Nullenergiegebäude und andererseits die Anwendung innovativer Inbetriebnahme- und Betriebsführungsmethoden einem breiten Publikum aus der Energiebranche in der Praxis vorzustellen.

1.2.1 Bauherr

Das RIZ Energie wurde im Dezember 2019 an die Hochschule Offenburg übergeben. Das Gebäude wurde durch die Europäische Union im Rahmen des Wettbewerbs RegioWin über den Europäischen Fonds für Regionale Entwicklung (EFRE), das Land Baden-Württemberg, die Hochschule Offenburg und einen eigenen Stifterkreis aus zehn kleinen und mittelständigen Unternehmen aus der Region, sowie durch die Stadt Offenburg finanziert. Bauherr ist das Land Baden-Württemberg, vertreten durch das Amt Vermögen und Bau (Amt Freiburg). Das RIZ Energie ist Schnittstelle zur regionalen Wirtschaft. Nach Abschluss der Inbetriebnahme nutzen nun mehrere Kooperationspartner das RIZ Energie als Forschungs- und Entwicklungsplattform.

1.2.2 Baubeschreibung und Gebäudekenndaten

Wie in Abbildung 2 zu sehen ist, befinden sich auf der Westseite im Erdgeschoss die technischen Räume, in denen alle Komponenten der Elektro-, Sanitär- und Heizungsanlage sowie der Werkstattbereich untergebracht sind. Auf derselben Seite im ersten, zweiten und dritten Stock befinden sich die Büros mit Arbeitsplätzen, Kopier- und Serverräume, Küchen, Besprechungsräume usw.

An der Ostseite des Gebäudes befindet sich das Technikum, das sich vom Erdgeschoss bis zum zweiten Obergeschoss des Gebäudes erstreckt. Über dem Technikum im dritten Obergeschoss befinden sich die Außenlaborfläche und ein Technikraum der die Lüftungsanlage des Gebäudes beinhaltet.

Das RIZ Energie besteht aus über 60 Arbeitsplätze in einer innovativen Umgebung, sowie einem Technikum mit rund 800 m² Grundfläche und 8.000 m³ umbautes Volumen. Die Forschung findet in diesem, als Holzbau mit Fachwerkträgern umgesetzten Technikum statt, während der Bürokomplex in Sichtbeton ausgeführt ist.

Die Nutzungszeiten des Gebäudes sind Montag bis Freitag von 7 bis 18 Uhr.

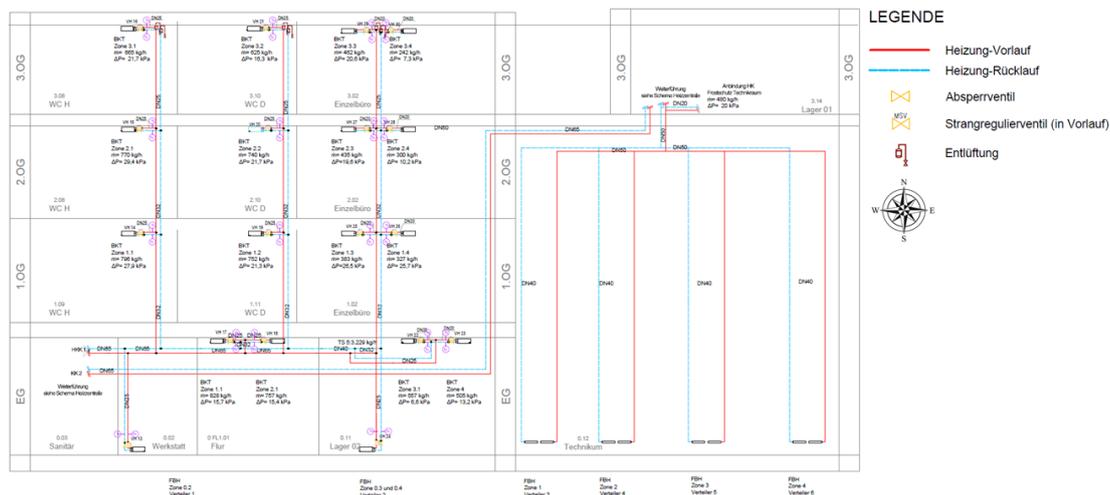


Abbildung 2 Ausschnitt des Gebäudes von der Südseite.

1.3 Energiekonzept des RIZ Energie

Das Gebäude wurde als netzdienliches Nullenergiegebäude realisiert und bietet eine sehr hohe Arbeitsplatzqualität. Erzeugungs-, Verteil- und Übergabesysteme werden dabei bedarfsgerecht, netzdienlich und energieoptimiert geregelt. Hier kommen neben etablierten Algorithmen sowohl optimierte konventionelle Regelstrategien, als auch bei den Projektpartnern entwickelte, innovative Algorithmen zum Einsatz.

Das RIZ Energie ist ein nachhaltiges Gebäude, das mit Fokus auf folgende Schwerpunkte geplant wurde:

- **Konsistenz / ökologische Ziele:** Holzbau, Umweltenergiekonzept, Solarstrom.
- **Effizienz / ökonomische Ziele:** hocheffiziente TGA-Komponenten, insb. Wärmepumpe, Übergabesysteme und Beleuchtung. Einhalten des vorgegebenen Kostenrahmens.
- **Suffizienz / soziale Ziele:** hohe Arbeitsplatzqualität (insb. hohe Raumluftqualität), über die gesetzlichen Vorgaben deutlich hinausgehend, reduzierter Primärenergiebedarf.

Das Gebäude und Technikum des RIZ Energie zeichnet sich aus durch:

- Gebäudehülle in Passivhausstandard mit sehr gutem sommerlichem und winterlichem Wärmeschutz. Fassade und gesamtes Technikum in Holz ausgeführt.
- Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung.
- Bauteilaktivierung mit Betonkerntemperierung für das Lastmanagement und oberflächennaher Aktivierung im Fassadenbereich zur bedarfsgerechten, individuellen Regelung.

- Industrieflächentemperierung im Technikum.
- Grundwasser-Wärmepumpe mit sommerlichem Bypass-Betrieb für die Kältebereitstellung
- 30 kWp Photovoltaikanlage zur Deckung von 100 % Energiebedarf für Heizen, Kühlen, Lüften und Beleuchten im Bürotrakt.
- hocheffiziente Anlagenkomponenten (inkl. Beleuchtungstechnik)
- 8 Technikumsplätze (9 m x 9 m x 10 m) mit IT/Strom (230V/380V), Kühlung / Abwärmenutzung, Erdgas. Vernetzbar. Auf drei Ebenen (0 m, 3 m und 6 m) erreichbar. Versorgung von oben und/oder unten realisierbar. Technische Gase separat aus Außenlager durch Bodenkanal. Großvolumige Aufbauten.
- Großzügiger Werkstattbereich auch für kleine Versuche.

Die nachhaltige Klimatisierung im Komfortbereich des Gebäudes ist ein elementarer Kern des Forschungsansatzes und essenzieller Teil der Gebäudephilosophie. Die hier nutzerseitig getroffenen Anforderungen mussten präzise eingearbeitet und umgesetzt werden.

Abbildung 3 zeigt das Anlagenkonzept für Heizen, Kühlen und Lüften im Sommer- und Winterbetrieb. Als Wärme-/ Kälteerzeuger dient eine Grundwasserbrunnenanlage, welche sowohl als direkte „Kältequelle“, wie auch mit einer Wärmepumpe als Wärmesenke dient. Als Raumübergabesystem wird im Technikum eine Industriefußbodenheizung/-kühlung eingesetzt. Die Klimatisierung des Bürobereichs erfolgt durch zwei thermoaktive Bauteilsysteme (TABS) als Betonkerntemperierung (BKT). Über eine BKT in Mittellage erfolgt nachts die Grundtemperierung durch eine außentemperaturgeführte Vorlauftemperatur-Steuerung, während tagsüber zur dynamischen Raumregelung zusätzlich oberflächennahe BKT-Kreise raumtemperaturgeführt eingesetzt werden. Weiterhin werden Konvektorsysteme für die Serverräume verwendet.

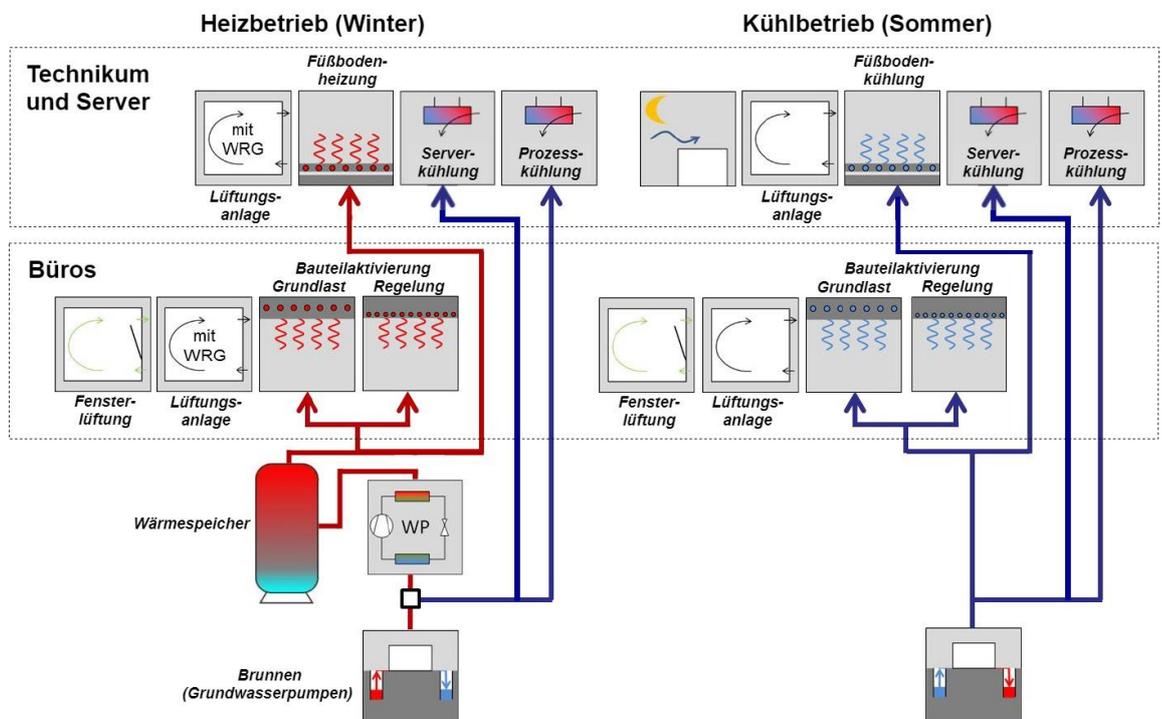


Abbildung 3 Anlagenkonzept

Der Grundluftwechsel des Gebäudes wird über eine autark geregelte zentrale Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung sichergestellt und durch Fensterlüftung bei Nutzerbedürfnis unterstützt. Die Luftverteilung im Gebäude erfolgt druckgeführt und wird CO₂-abhängig über Volumenstromregler geregelt.

Aus weiteren Gewerken wie Sanitär- und Elektrotechnik werden einzelne Meldungen bzw. Schaltbefehle aufgenommen. Die Raumautomation erfolgt ganzheitlich als Regelung der Raumheizung und -kühlung, der Luftmengen, Jalousien und der Beleuchtung.

2 Digitale Zwillinge des RIZ Energie

Ein digitaler Zwilling ist in der Gebäudetechnik ein vollständiges, digitales Abbild eines Gebäudes (mit seiner gesamten Anlagentechnik). Eines der Ziele dieses Projekts war die Entwicklung und Validierung eines Verfahrens unter Verwendung digitaler Zwillinge zur Optimierung des Energieverbrauchs, zur Erhaltung der Arbeitsplatzqualität und zur Fehlererkennung und -diagnose der Technischen Gebäudeausrüstung (TGA) (insb. Lüftungsanlage und Thermoaktive Bauteilsysteme) während des Gebäudebetriebs.

Im Rahmen des Projekts BUiLD.DIGITIZED wurden zwei digitale Zwillinge des RIZ Energie entwickelt:

- **BIM-Modell** (auch „statischer digitaler Zwilling“), das aus allen unveränderlichen Informationen des Gebäudes und der technischen Gebäudeausrüstung besteht, wie z. B. den bauphysikalischen Kennzahlen der Baumaterialien, wie dem Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Werte) der Gebäudehülle oder komponentenspezifischen Geräte Kennzahlen, wie der Leistungszahl (COP) der Wärmepumpe
- **Gebäude- und Anlagensimulation** (auch „dynamischer digitaler Zwilling“), die aus Grey-Box-Modellen besteht, mit dem BIM-Modell parametrisiert ist und unter Verwendung von Eingangsdaten aus dem Monitoring für die Betriebsoptimierung des Gebäudes verwendet werden kann. Dazu werden die Simulationsergebnisse mit Monitoring-Daten verglichen.

2.1 BIM-Modell

Das BIM-Modell des RIZ Energie Gebäudes wurde in drei Schritten erstellt. Zunächst erstellte die Birk Heilmeyer und Frenzel Gesellschaft von Architekten mbH das 3D-Architekturmodell (ganz links der Abbildung 4) in der CAD-Software VectorWorks. Hier sind alle Informationen der Gebäudebestandteile wie Fensterflächen, Wandflächen, Bodenflächen, Wärmedurchgangskoeffizienten etc. sowie ein Referenzpunkt bzw. Nullpunkt im Modell enthalten.

Gleichzeitig wurde von der Firma solares bauen GmbH, die für die Planung der gesamten technischen Gebäudeausrüstung beauftragt war, das 3D-Modell der TGA-Komponenten wie Rohrleitungen, HLK-Anlage, Wärmepumpe, Grundwasserpumpen, Armaturen etc. mit den jeweiligen technischen Daten in der C.A.T.S.-Software erstellt (in der Mitte der Abbildung 4). Anschließend wurden beide 3D-CAD-Dateien im IFC 4-Format und mit Hilfe des oben erwähnten Nullpunktes zu einer Datei zusammengeführt (ganz rechts der Abbildung 4).

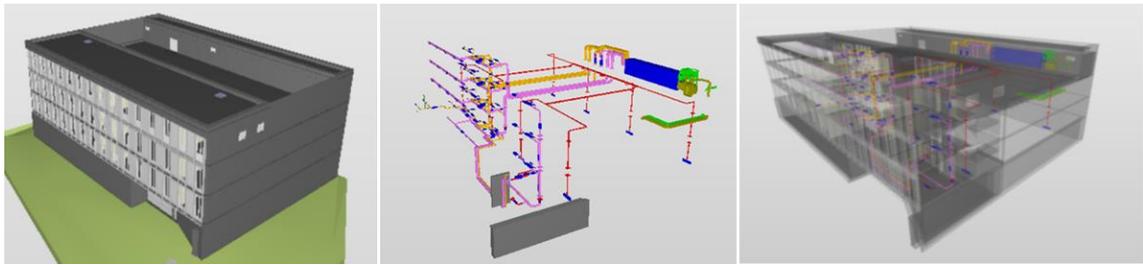


Abbildung 4 BIM Modell des RIZ Energie

Die Abkürzung IFC steht für Industry Foundation Classes und bezeichnet einen primären, weltweiten, offenen Standard für den Datenaustausch in der Bauindustrie. Es werden beispielsweise Informationen des Gebäudes, der Architektur, sowie Informationen der Anlagentechnik gefiltert und weiterverarbeitet. Aus den gewonnenen IFC-Daten wird anschließend das Simulationsmodell parametrisiert. Ein digitaler Rundgang durch das BIM-Modell des Gebäudes ist auf dem folgenden Link der Projektwebsite (<https://build-digitized.hs-offenburg.de/ergebnisse>) zu finden.

2.2 Methode zur Parametrisierung eines Simulationsmodells mit einem BIM-Modell

Dieses Kapitel soll zeigen, inwieweit die BIM-Methode als Schnittstelle zu Simulationsmodellen fungieren kann. Für die methodische Aufarbeitung dieser Aufgabenstellung wurde ein Container, der im Rahmen eines studentischen Projektes (SHK4Future) der Hochschule Offenburg und der Richard Fehrenbach Gewerbeschule Freiburg zu einem energieautarken Tiny House umgebaute wurde, als Beispielobjekt verwendet. Dieser wurde in der Architektursoftware REVIT als 3D-Modell konstruiert, in das IFC-Austauschformat exportiert und über ein Python-Skript weiterverarbeitet.

Durch die Umsetzung dieser Methode mit dem Container-BIM-Modell konnte gezeigt werden, dass die Schnittstelle methodisch funktioniert. Dazu wurde das, im Vergleich zum RIZ-Modell, weniger komplexe Container-Modell verwendet, das ebenfalls über die wesentlichen Komponenten eines Gebäudemodells verfügt. Das Energiekonzept des Containers wird im Folgenden kurz erläutert, um eine Vorstellung der wichtigsten Komponenten zu vermitteln, da es gewisse Ähnlichkeiten mit dem RIZ Energie aufweist.



Abbildung 5 Studentisches Projekt SHK4Future

Die Energiegewinnung des Containers basiert ausschließlich auf Solarenergie. Durch die PVT – Kollektoren wird die solare Strahlung in Strom und in Wärme umgewandelt. Dabei wird der Solarstrom von einem Wechselrichter auf 48 Volt Gleichstrom oder 230 Volt Wechselspannung transformiert. Dieser dient als Laderegler für eine Batterie und als Spannungsquelle für elektrische Verbraucher im Container. Im Winter sorgt die Wärmepumpe für warme Raumtemperaturen im Tiny House. Mithilfe der Solarwärme wird das Kältemittel der Wärmepumpe auf der kalten Seite verdampft. Der Verflüssiger (die warme Seite der Wärmepumpe) erzeugt über eine Fußbodenheizung und einer Deckenaktivierung die gewünschte Raumtemperatur und beladet gleichzeitig den Wärmespeicher. Bei schlechten Wetterlagen, in denen nur wenig Strahlung für die Solarkollektoren vorhanden ist, liefert der Wärmespeicher seine Energie an die benannten Übergabesysteme. Die Wärmepumpe kann auch im Sommer über die kalte Seite (dem Verdampfer) Kälte erzeugen. Die entstandene Wärme wird im Wärmespeicher zwischengespeichert und nachts über die Solarkollektoren an die Umgebung abgegeben. Somit steht für den nächsten Sommertag ein abgekühlter Wärmespeicher zu Verfügung [1].

Die praktische Bearbeitung wurde in folgende vier Arbeitsschritte aufgeteilt. Diese bilden zusammen ein Gesamtprozess, in dem veranschaulicht wird wie Daten aus einem 3D – Modell gewonnen werden und für ein benötigtes Gebäudesimulationsmodell bereitgestellt werden können.

1. 3D-Konstruktion in Revit des SHK4Future-Containers (siehe Abbildung 7)
2. Exportierung des 3D-Modells in IFC
3. Verarbeitung der Daten in IfcOpenShell
4. Übergabe der Parameter an ein Simulationsmodell

Wie in der Abbildung 6 zu sehen ist, wird für die Konstruktion des Containermodells die Architektursoftware Revit verwendet. Das erstellte Modell wird als IFC-Datei exportiert und anschließend in ein Python-Skript eingelesen. Mit Hilfe des Python Moduls IfcOpenShell werden die Daten der IFC-Datei verarbeitet, gefiltert und in eine Excel Liste übertragen. Mit den daraus gewonnenen Daten können Simulationen parametrisiert werden. Im Zuge dieser Arbeit wird dies an Gebäudesimulationen in Python angewendet.

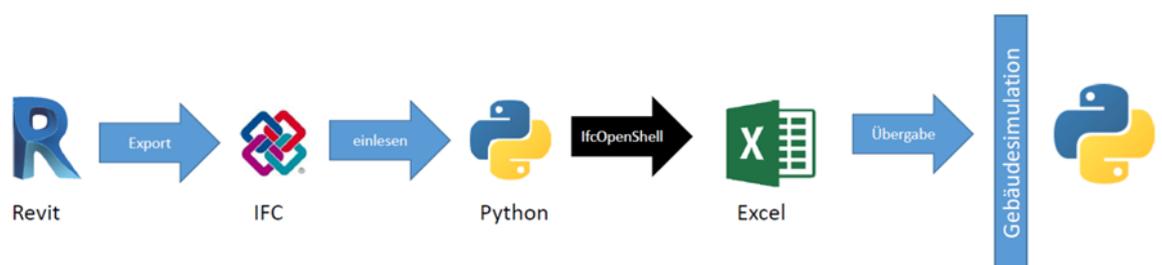


Abbildung 6 Schnittstellen Workflow

In Abbildung 7 wird der Innenraum des Containers dargestellt. Hier sind alle TGA-Bauteile sichtbar. Auf der rechten Seite sind Wärme- und Kältespeicher zu sehen, die hintereinander angeordnet sind. Zwischen den Speichern befindet sich zudem ein Ausdehnungsgefäß. Links daneben ist die Wärmepumpe zu sehen (hier wurde das 3D-Modell vom Hersteller bereitgestellt). Auf der linken Seite sind die Lüftung, die Verteilung und die Verrohrung der Übergabesysteme dargestellt. Die orangenen Komponenten auf dem Dach stellen die PVT-Kollektoren dar.



Abbildung 7 SHK4Future-Container 3D-Außenansicht (Oben) und -Innenansicht (Unten).

Der zweite Arbeitsschritt befasst sich mit der Vorbereitung und Durchführung des Modell-Exports. Nachdem die Parameter der einzelnen Komponenten hinterlegt sind, wird nun explizit auf die Vorbereitung des IFC-Exports eingegangen. Dabei wird innerhalb der Revit-Software, ein Sollzustand der gewünschten IFC-Klassen angelegt. Anschließend wird das Modell exportiert. Der erzeugte Istzustand wird in einem softwareunabhängigen IFC-Viewer eingesehen und kontrolliert. Hier kann bereits festgestellt werden, ob zum einen die Geometrie richtig exportiert wurde und zum anderen, ob alle gewünschten Parameter und Eigenschaftsätze beim Export erzeugt wurden.

Im dritten Arbeitsschritt wird die IFC-Schnittstelle programmiert. Dabei werden Kenntnisse des IFC-Strukturaufbaus und der speziellen Syntax, von `lfcOpenShell`, relevant. In diesem Arbeitsschritt sind vor allem die korrekte Auswahl der IFC Klassen und deren Eigenschaftslisten von großer Bedeutung.

Der vierte Arbeitsschritt ist der letzte wichtige Schritt, der die Parametrisierung methodisch abschließt. Hierbei werden, anhand einer Beispielsimulation, die Parameter eingelesen. Diese wurden zuvor mit der `lfcOpenShell`-Schnittstelle aus dem IFC-Datenformat extrahiert und in einer Excelliste zur Verfügung gestellt. Die Beispielsimulation beinhaltet das SHK4Future Containermodell, sowie die Wärmepumpe und ermöglicht eine Heizbedarfsberechnung. Da nur eine Komponente abgebildet wird, ist diese Simulation nicht vollständig, aber dennoch ausreichend, um die beschriebene Methode zu testen. Ergänzend könnten weitere technische Komponenten, wie die PVT-Kollektoren und Speicher, in das Modell eingefügt werden. Um die Funktionsweise der Parameterübergabe an der Simulation zu prüfen, kann auf zusätzlichen Komponenten verzichtet werden. Als Ergebnisse der Simulation werden die Raumtemperatur und eine operative Temperatur ausgegeben.

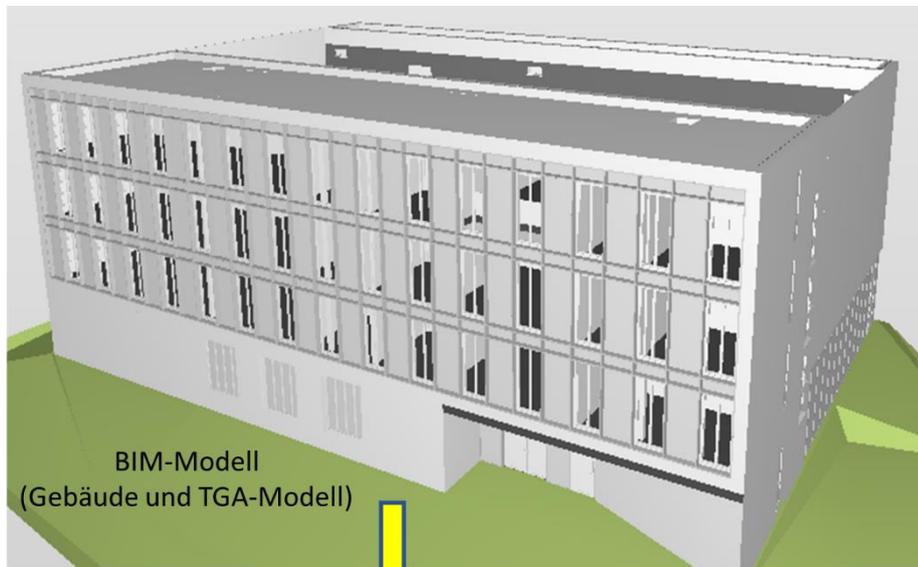
Das IFC-Datenaustauschformat und die Methode zur Parametrisierung eines Simulationsmodells sind anwendbar. Voraussetzung ist allerdings ein geschultes Personal, das mit dem IFC-Strukturaufbau vertraut ist. Anschließend können Messdaten, wie Temperaturverläufe und weiter Sensordaten über eine entsprechende Software ins IFC-Schema exportiert werden.

Ausführlichere Informationen zu diesem Thema sind auf der Projektwebsite unter dem folgenden Link zu finden (<https://build-digitized.hs-offenburg.de/ergebnisse>)

2.3 Gebäude- und Anlagensimulation

Abbildung 9 zeigt den Entwicklungsprozess des dynamischen digitalen Zwillings in zwei Stufen:

1. **Simulationsmodell „Design“** nach ISO 13790 zur Parametrierung aus dem BIM-Modell (siehe Abbildung 8) sowie zur Validierung (in Kombination mit dem zweiten Schritt). Die Simulation mit dem Testreferenzjahr für Offenburg liefert den simulierten Nutzenergiebedarf für Heizung und Kühlung. Im Vergleich zum Nutzenergiebedarf nach EN 12831 aus dem GEG-Nachweis gelingt eine erste Parametrierung aus dem Abgleich mit Planungsdaten.
2. **Simulationsmodell „Operation“** mit Kopplung von dem bereits parametriertem Gebäudemodell und Anlagenmodellen (insb. Lüftungsanlage, Wärmetauscher, Wärmepumpe, Wärmespeicher, Bauteilaktivierung und Grundwasserpumpen) zur Berechnung des aktuellen Innenraumklimas und Endenergiebedarfs (Strom). Im Vergleich mit dem gemessenen Innenraumklima und Endenergieverbrauch kann das Modell zunächst validiert, dann trainiert und danach adaptiert werden, um sowohl eine Fehleranalyse als auch eine betriebsbegleitende Optimierung realisieren zu können. Hier werden die aktuellen Wetterdaten, Grundwassertemperaturen und Anwesenheitszeiten als Eingangsdaten genutzt.



Parametrisierung (Flächen, U-Werte usw.)

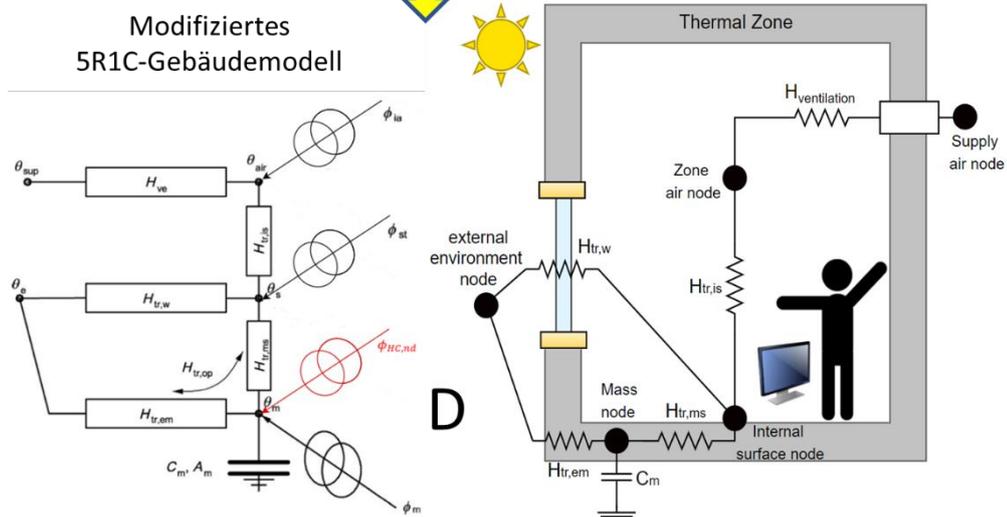


Abbildung 8 Modellschema und Modifiziertes 5R1C-Gebäudemodell nach DIN EN ISO 13790

Die Modifikation des ursprünglichen Modells besteht in der "Verschiebung" der Heiz- bzw. Kühlleistung ($\Phi_{HC,nd}$) vom Luftknoten (θ_{air}) zum Massenknoten (θ_m). Bei TABS erfolgt die Leistungsabgabe über die thermische Masse bzw. Oberfläche der aktivierten Bauteile. Dieser Zusammenhang ist im originalen 5R1C-Modell nicht dargestellt. Um diese Einschränkung zu entfernen und die Trägheit der TABS abzubilden, wird, wie bereits erwähnt, $\Phi_{HC,nd}$ auf den Masseknoten (θ_m) verschoben (siehe Abbildung 8). Hierfür wird $\Phi_{HC,nd}$ aus den Knotengleichungen für θ_{air} (Gl. 2.1) und θ_s (Gl. 2.2) entfernt und bei der Gleichung für die Erhöhung der Massentemperatur $\dot{\Phi}_m$ (Gl. 2.3) hinzugefügt (für die ursprüngliche Gleichungen siehe Anhang C: DIN EN ISO 13790):

$$\theta_{air} = \frac{H_{tr,is} \cdot \theta_s + H_{ve} \cdot \theta_{sup} + \Phi_{ia}}{H_{tr,is} + H_{ve}} \quad (2.1)$$

$$\theta_s = \frac{H_{tr,ms} \cdot \theta_m + \Phi_{st} + H_{tr,w} \cdot \theta_e + H_{tr,1} \left(\theta_{sup} + \frac{\Phi_{ia}}{H_{ve}} \right)}{H_{tr,ms} + H_{tr,w} + H_{tr,1}} \quad (2.2)$$

$$\dot{\Phi}_m = \frac{A_m}{A_{tot}} (0,5 \cdot \Phi_{int} + \Phi_{sol}) + \Phi_{HC,nd} \quad (2.3)$$

Mit:

- θ_{air} Innenlufttemperatur in °C
- $\Phi_{HC,nd}$ Heizwärme- bzw. Kühlbedarf in W
- $H_{tr,is}$ thermischer Kopplungsleitwert in W/K
- θ_s Oberflächentemperatur in °C
- H_{ve} Wärmetransfer durch Lüftung in W/K
- θ_{sup} Zulufttemperatur der Lüftungsluft in °C
- Φ_{ia} Interne Wärmestrahlung in W
- $H_{tr,ms}$ Wärmetransferkoeffizient des Leitwertterms in W/K
- θ_m Temperatur der Masse in °C
- Φ_{st} Interne und solare Strahlung in W
- $H_{tr,w}$ Wärmetransfer durch Transmission in W/K
- θ_e Temperatur der Außenumgebung in °C
- $H_{tr,1}$ Ersatzwärmetransferkoeffizient des Leitwertterms in W/K
- A_m wirksame massebezogene Fläche in m²
- A_{tot} Oberflächeninhalt aller Flächen, die zur Gebäudezone weisen in m²
- Φ_{int} Wärmeströme von inneren Wärmequellen in W
- Φ_{sol} Wärmeströme von solaren Wärmequellen in W

Dieser digitale Zwilling dient zunächst für eine BIM-gestützte Inbetriebnahme, indem er in der Testphase zur modellbasierten Fehlererkennung eingesetzt wird, und darüber hinaus in verschiedenen Prozessschritten zur Betriebsoptimierung wie später in Kapitel 9 und Kapitel 10 erläutert, angewendet wird.

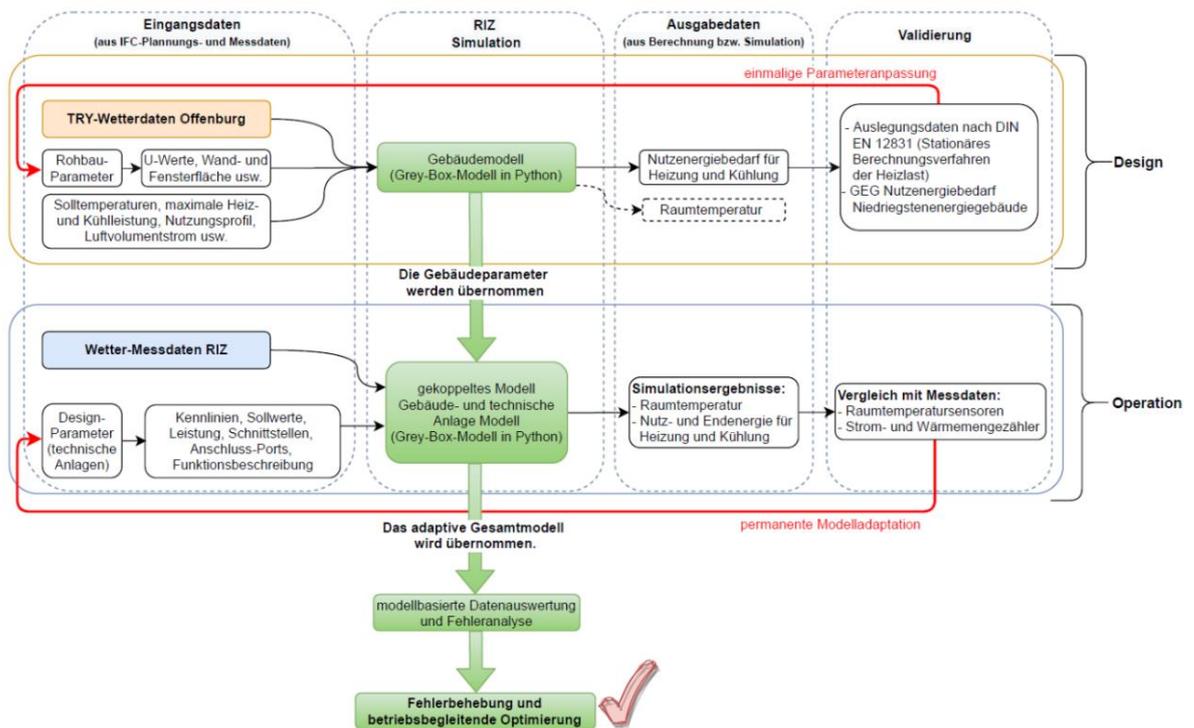


Abbildung 9 Vereinfachtes Datenflussdiagramm für die Entwicklung, Implementierung und Anwendung des digitalen Zwillings, hier nur für die gekoppelte Gebäude- und Anlagensimulation.

Im Folgenden wird das Simulationsverfahren erläutert. Wie unten dargestellt, wurde das Grey-Box-Modell als signalflussbasierter Simulationsprozess in Python programmiert:

INPUT → Gebäudemodell(e) → MSR-Modul → Anlagenmodell(e) →
OUTPUT

Als Eingangsgrößen sollen ausschließlich Wetter- und ggf. einzelne Nutzungsdaten verwendet werden. So arbeitet die Klimatisierung der Büros im Januar im Heizbetrieb und nutzt zur Beheizung die Umweltenergie des Grundwassers über eine Wärmepumpe, während das MSR-Modul im Juli durch einen Bypass die Wärmepumpe umgeht und mithilfe der Temperaturen des Grundwassers in den Kühlbetrieb wechselt. Dabei wird ein gerichteter Datenfluss von Modell zu Modell realisiert. Eine numerische Iteration ist also nicht möglich und wird ggf. durch entsprechende Annahmen (insb. Pingpong- statt Onion-Prinzip) umgesetzt.

Abbildung 10 zeigt einen schematischen Ausschnitt aus dem Heizsystem. Hier sind drei der Hauptkomponenten zu sehen: Wärmetauscher, Wärmepumpe und Wärmespeicher. Hier wird beispielsweise am Wärmetauscher die Ausgangstemperatur der Sekundärseite berechnet und als Eingangstemperatur des Verdampfers der Wärmepumpe genutzt. Die berechnete Wärmeleistung der Wärmepumpe wird dann als Eingangsleistung für den Wärmespeicher genutzt. Diese Energiewandlung wird von Komponente zu Komponente fortgeführt, wobei keine einheitlichen Übergabeprotokolle vereinbart werden müssen und auch nicht genutzt werden.

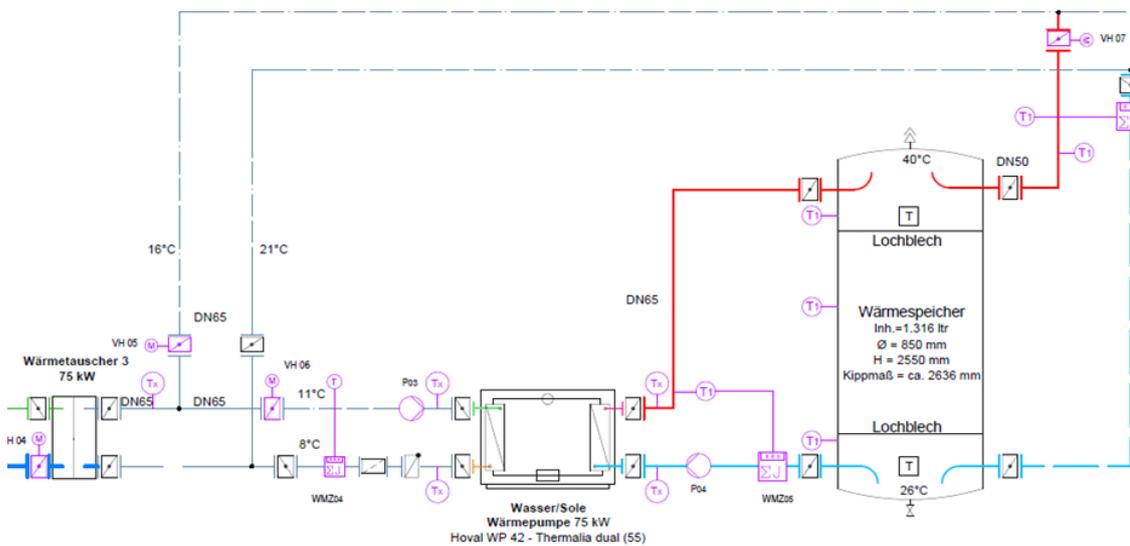


Abbildung 10 Schema der Heizungsanlage am RIZ Energie (Ausschnitt)

Abbildung 11 zeigt in einem Datenflussdiagramm wie alle Modelle in Bezug auf Eingabe- und Ausgabedaten miteinander verbunden sind. In Gelb sind alle gemessenen Eingangsdaten, in orange alle Modelle, in grau die Kontrollmodule und in Rot die Simulationsergebnisse.

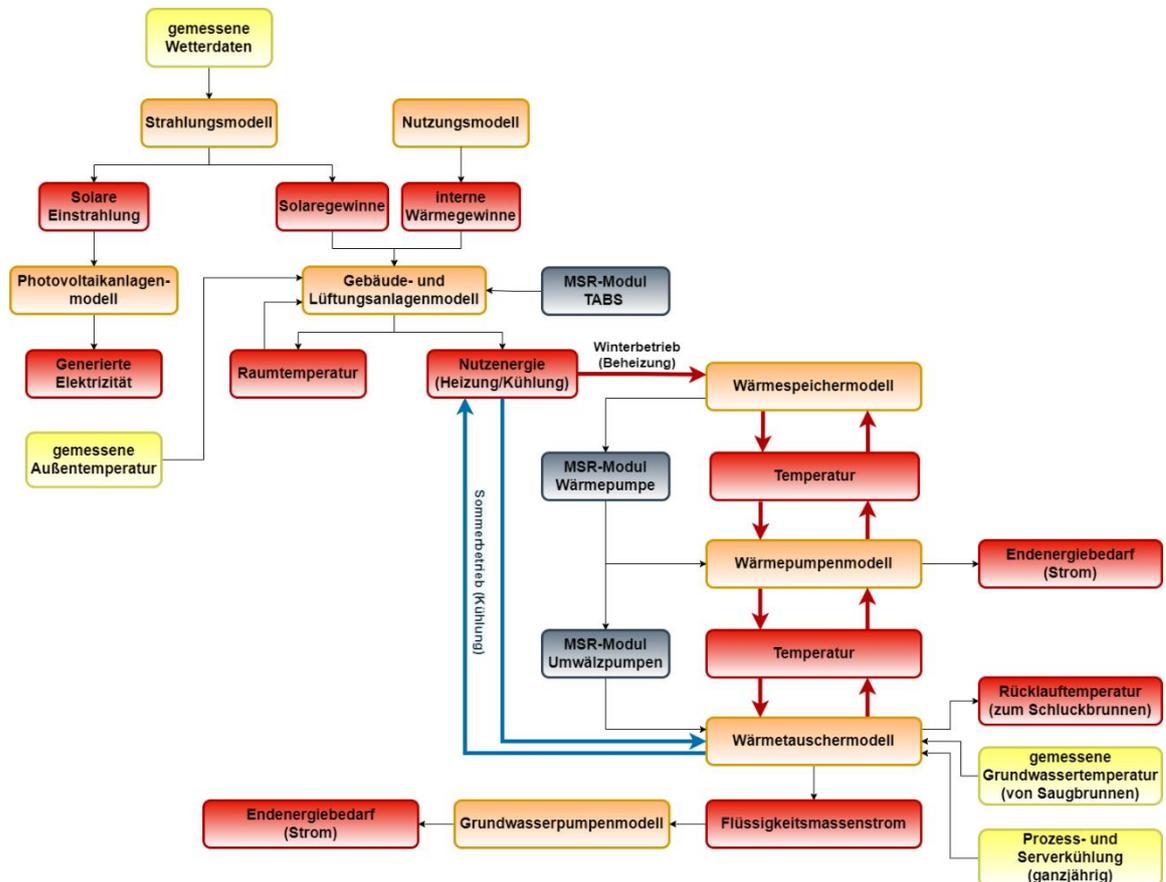


Abbildung 11 Datenflussdiagramm der Python-Modelle

Die Simulation enthält alle fünf Zonen des Gebäudes (ohne interzonalen Wärmestrom), siehe Abbildung 12:

- Zone 1 (blau) = Technikum, dessen Raumhöhe sich über drei Geschosse erstreckt
- Zone 2 (grün) = Lagerräume und Werkstätten im Erdgeschoss.
- Zone 3 (gelb) und Zone 4 (violett) = Büroebenen im 1. und 2. Obergeschoss, mit gleichen Parametern und Eigenschaften
- Zone 5 (rot) = Büroebene (3. Obergeschoss) mit Dach und Außenwand zum Außenlabor

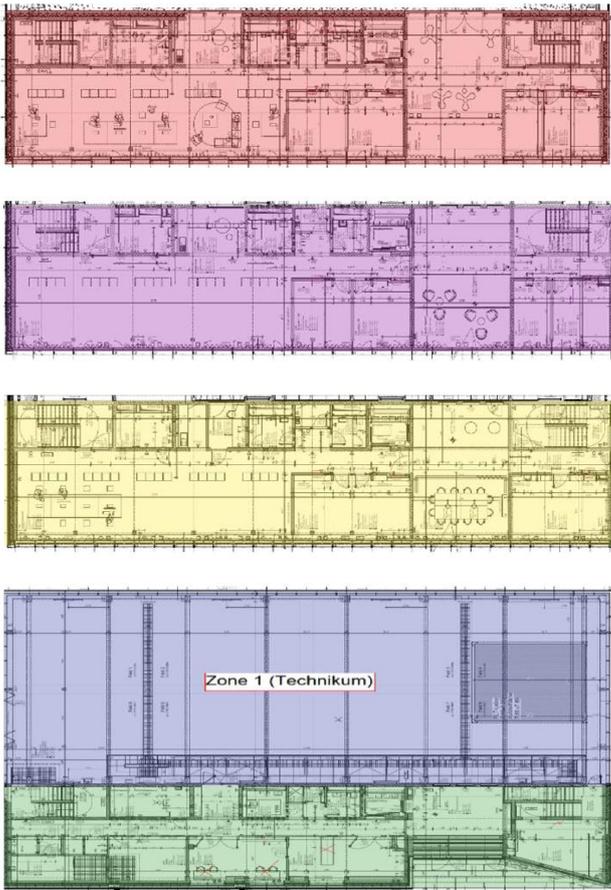


Abbildung 12 Von unten nach oben: Zone 1 (Technikum, blau), Zone 2 (Erdgeschoss, grün), Zone 3 (1. Obergeschoss, gelb), Zone 4 (2. Obergeschoss, lila) und Zone 5 (3. Obergeschoss, ohne Technikzentrale, rot)

Ausführlichere Informationen zu den Simulationsmodellen sind im technischen Bericht zur Gebäudemodellierung [2] zu finden.

3 AP1: BIM-basierte Algorithmen zur Unterstützung der Inbetriebnahme von technischen Anlagen (Fraunhofer ISE)

3.1 MoTive

3.1.1 Vorarbeiten

In diesem Arbeitspaket erfolgte zunächst eine Sichtung von Normen, Richtlinien und Praxisberichten zu Inbetriebnahme und technischem Monitoring gebäudetechnischer Anlagen. Folgende Normen und Richtlinien wurden dabei näher betrachtet:

- VDI 6039: Inbetriebnahmemanagement für Gebäude [3]
- AMEV-Richtlinie (Arbeitskreis Maschinen- und Elektrotechnik staatlicher und kommunaler Verwaltung) zum technischen Monitoring (AMEV-TMon) [4]
- Qualitätsmanagement für Gebäude - Verbesserung der Gebäude-Performance durch Technisches Monitoring und Inbetriebnahmemanagement der REHVA (Federation of European Heating, Ventilation and Air Conditioning Associations) [5]
- VDI 6010: Sicherheitstechnische Einrichtungen für Gebäude [6]

Die Empfehlungen der AMEV-TMon haben in den vergangenen Jahren an Bedeutung gewonnen und werden zunehmend im Rahmen von Neubauprojekten und Sanierungen öffentlicher Gebäude berücksichtigt. Gleichzeitig gibt es einen anhaltenden Trend zur Planung und Umsetzung von Bauprojekten mit BIM (Building Information Modeling). Bisher fehlen jedoch Werkzeuge, um die vorhandenen BIM-Informationen mit den Anforderungen aus der AMEV-TMon abzugleichen und um die Inbetriebnahme nach VDI 6039, die Einregulierung und die energetische Optimierung der Anlagen auf Basis von Messdaten zu unterstützen. Auf Basis dieser Erkenntnisse wurden Inhalte und Teilprozesse identifiziert, welche für eine digitale, BIM-basierte Inbetriebnahme relevant sind. Die Vorarbeiten wurden abgeschlossen, in dem ein erstes Konzept für ein digitales interaktives Anlagenverzeichnis erstellt wurde. Weitere Details zu dem MoTive Algorithmus sind ebenfalls im technischen Bericht [7] zu finden.

3.1.2 MoTive: Web-basiertes Werkzeug für das Technische Monitoring

Im weiteren Verlauf des Projektes wurde das Werkzeug MoTive (Monitoring InteracTive) entwickelt. Das Web-basierte Werkzeug ermöglicht es, auf Basis von BIM-Informationen automatisch ein Anlagenverzeichnis und ein interaktives Anlagenschema zu erstellen und alle relevanten semantischen und topologischen Informationen zu den Anlagen, Sensoren und Aktoren abzurufen. Weiterhin besteht eine Verknüpfung zu den in der AMEV-Tmon definierten Prüfgrößen-Datensätzen für verschiedene TGA-Anlagen („AMEV-Datenbank“) und einer Zeitreihen-Datenbank der Monitoringplattform des Projektpartners mondas (siehe Abbildung 13). Mithilfe von MoTive können Prozesse im Facility Management wie die Inbetriebnahme von Anlagen oder die energetische Betriebsoptimierung vereinfacht und beschleunigt werden. Die App basiert auf dem open-source Python Framework Dash¹ und auf der JavaScript-Bibliothek GoJS². Die Funktionalitäten werden im Folgenden detailliert beschrieben.

¹ <https://dash.plotly.com/>

² <https://gojs.net/latest/index.html>

- *Anlagenverzeichnis*: Eine interaktive Übersicht aller Komponenten-Typen wie z.B. Pumpen, Ventile, Sensoren, etc. und deren Anzahl wird automatisch aus der IFC-Datei generiert. Bei Auswahl eines Komponenten-Typs erhält man eine Liste der Objekte des jeweiligen Typs mit ID, Name und Eigenschaften (z.B. Abmessungen).
- *AMEV-Prüfgrößen*: Mit Hilfe eines Drop-Down-Menüs kann ein Anlagen-Typ wie z.B. Lüftungsanlage, Wärmepumpe, etc. ausgewählt werden, für welchen die Liste der erforderlichen Prüfgrößen nach AMEV-TMon angezeigt wird. Die Position der Sensoren für den ausgewählten Anlagentyp werden automatisch im darunterliegenden Anlagenschema (in gelb) angezeigt.
- *Automatisierter Sensorabgleich*: Beim Drücken der Schaltfläche „VERGLEICHE MIT DATENPUNKTLISTE“ werden die Prüfgrößen automatisiert mit den Sensoren aus der IFC-Datei bzw. der Datenpunktliste abgeglichen und jedem Eintrag aus der AMEV-Liste wird, falls vorhanden, eine passende ID aus der Datenpunktliste zugeordnet.
- *TGA-Schema*: Auf Basis der IFC-Datei werden die topologischen Zusammenhänge zwischen den Komponenten extrahiert, in Form eines Graphs aus Knoten und Kanten in eine JSON-Datei überführt und in einem interaktiven Anlagenschema dargestellt. Die anfänglichen Positionen der Elemente und Verbindungen lassen sich per click-and-drag anpassen. Zusätzliche Informationen zu den Komponenten erhält man beim Bewegen des Mauszeigers über die jeweilige Komponente. Die Symbole und Farben entsprechen den unterschiedlichen Komponenten-Typen bzw. unterscheiden Luftkanäle und Wasserleitungen sowie Vorlauf, Rücklauf, Zuluft, Abluft, Außenluft und Fortluft. Auch die Fließrichtung der Medien wird angezeigt.
- *Visueller Sensorabgleich*: Beim Drücken der Schaltfläche „ZEIGE SENSOREN AUS IFC/DATENPUNKTLISTE“ werden die Sensoren aus der IFC-Datei bzw. der Datenpunktliste automatisch im darunterliegenden Anlagenschema (in orange) angezeigt. Dies ermöglicht einen visuellen Abgleich mit den Prüfgrößen der AMEV-TMon.
- *Subkomponentendarstellung*: Beim Drücken der Schaltfläche „ZEIGE SUBKOMPONENTEN“ werden Subkomponenten einzelner Komponenten angezeigt, die in der IFC-Datei enthalten, jedoch nicht direkt untereinander verbunden sind. Die fehlenden topologischen Verknüpfungen werden mittels zusätzlich hinterlegter Informationen über übliche Topologien solcher Anlagen (z.B. Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung, Erhitzer und Kühler) ergänzt.
- *Gruppierung*: Komponenten, die dem gleichen System (z.B. Zuluft, Abluft, Vorlauf Heizkreis, etc.) zugeordnet sind, können in der Darstellung gruppiert werden und somit gemeinsam angezeigt oder verborgen werden (siehe Abbildung 14). Dies erhöht die Übersichtlichkeit bei großen Systemen.
- *Speichern*: Ein manuell durch click-and-drag angepasstes Anlagenschema kann durch Drücken auf die Schaltfläche „Speichern“ (siehe Abbildung 14) abgespeichert werden, so dass später direkt das angepasste Layout geladen werden kann.
- *Zeitreihendaten*: Beim Hovern über einen (gelben) Sensor, erscheint der Sensornamen und ein Link zur mondas-Datenbank. Beim Klicken auf den Link gelangt man in einem neuen Tab zu der entsprechenden Zeitreihe des Sensors in der mondas-Datenbank.

AMEV TMon Datensatz

ID	Prüfungsbereich	Zustand	Messung	Einheit	Bemerkung
110848	Außenlufttemperatur		Messung	[°C]	Obj. - Installation für die Regelung vonwenniger Berechnungen z.B. als glattezeit
110849	Außenlufttemperatur		Messung	[°C]	Platzhalter
110870	Vorlauftemperatur	Stellwert ohne Toleranz	Messung	[°C]	Zustand get. via Kennlinie als Toleranz
110871	Rücklauftemperatur	Stellwert ohne Toleranz	Messung	[°C]	Zustand get. via Kennlinie als Toleranz
110872	Wasserversorgung der Heizanlage	Stellwert	Messung	[0-1]	zustand: Steuerung von Bauteilen über Netzwerk-Regelung
110873	Wasserversorgung der Heizanlage	Stellwert	Messung	[0-1]	zustand: Steuerung von Bauteilen über Netzwerk-Regelung
110874	Wasserversorgung der Heizanlage	Stellwert	Messung	[0-1]	zustand: Steuerung von Bauteilen über Netzwerk-Regelung
110875	Wasserversorgung der Heizanlage	Stellwert	Messung	[0-1]	zustand: Steuerung von Bauteilen über Netzwerk-Regelung
110876	Wasserversorgung der Heizanlage	Stellwert	Messung	[0-1]	zustand: Steuerung von Bauteilen über Netzwerk-Regelung
110877	Wasserversorgung der Heizanlage	Stellwert	Messung	[0-1]	zustand: Steuerung von Bauteilen über Netzwerk-Regelung
110878	Wasserversorgung der Heizanlage	Stellwert	Messung	[0-1]	zustand: Steuerung von Bauteilen über Netzwerk-Regelung
110879	Wasserversorgung der Heizanlage	Stellwert	Messung	[0-1]	zustand: Steuerung von Bauteilen über Netzwerk-Regelung
110880	Wasserversorgung der Heizanlage	Stellwert	Messung	[0-1]	zustand: Steuerung von Bauteilen über Netzwerk-Regelung
110881	Wasserversorgung der Heizanlage	Stellwert	Messung	[0-1]	zustand: Steuerung von Bauteilen über Netzwerk-Regelung
110882	Wasserversorgung der Heizanlage	Stellwert	Messung	[0-1]	zustand: Steuerung von Bauteilen über Netzwerk-Regelung
110883	Wasserversorgung der Heizanlage	Stellwert	Messung	[0-1]	zustand: Steuerung von Bauteilen über Netzwerk-Regelung
110884	Wasserversorgung der Heizanlage	Stellwert	Messung	[0-1]	zustand: Steuerung von Bauteilen über Netzwerk-Regelung
110885	Wasserversorgung der Heizanlage	Stellwert	Messung	[0-1]	zustand: Steuerung von Bauteilen über Netzwerk-Regelung
110886	Wasserversorgung der Heizanlage	Stellwert	Messung	[0-1]	zustand: Steuerung von Bauteilen über Netzwerk-Regelung
110887	Wasserversorgung der Heizanlage	Stellwert	Messung	[0-1]	zustand: Steuerung von Bauteilen über Netzwerk-Regelung
110888	Wasserversorgung der Heizanlage	Stellwert	Messung	[0-1]	zustand: Steuerung von Bauteilen über Netzwerk-Regelung
110889	Wasserversorgung der Heizanlage	Stellwert	Messung	[0-1]	zustand: Steuerung von Bauteilen über Netzwerk-Regelung
110890	Wasserversorgung der Heizanlage	Stellwert	Messung	[0-1]	zustand: Steuerung von Bauteilen über Netzwerk-Regelung
110891	Wasserversorgung der Heizanlage	Stellwert	Messung	[0-1]	zustand: Steuerung von Bauteilen über Netzwerk-Regelung
110892	Wasserversorgung der Heizanlage	Stellwert	Messung	[0-1]	zustand: Steuerung von Bauteilen über Netzwerk-Regelung
110893	Wasserversorgung der Heizanlage	Stellwert	Messung	[0-1]	zustand: Steuerung von Bauteilen über Netzwerk-Regelung
110894	Wasserversorgung der Heizanlage	Stellwert	Messung	[0-1]	zustand: Steuerung von Bauteilen über Netzwerk-Regelung
110895	Wasserversorgung der Heizanlage	Stellwert	Messung	[0-1]	zustand: Steuerung von Bauteilen über Netzwerk-Regelung
110896	Wasserversorgung der Heizanlage	Stellwert	Messung	[0-1]	zustand: Steuerung von Bauteilen über Netzwerk-Regelung
110897	Wasserversorgung der Heizanlage	Stellwert	Messung	[0-1]	zustand: Steuerung von Bauteilen über Netzwerk-Regelung
110898	Wasserversorgung der Heizanlage	Stellwert	Messung	[0-1]	zustand: Steuerung von Bauteilen über Netzwerk-Regelung
110899	Wasserversorgung der Heizanlage	Stellwert	Messung	[0-1]	zustand: Steuerung von Bauteilen über Netzwerk-Regelung
110900	Wasserversorgung der Heizanlage	Stellwert	Messung	[0-1]	zustand: Steuerung von Bauteilen über Netzwerk-Regelung

Anlagenverzeichnis

ZEIGE STRUKTUR FÜR AUSGEWÄHLTE KOMPONENTE	ZURÜCK ZUM ÜBERSICHT	Anzahl
<input type="radio"/> IFCUnitaryEquipment		1
<input type="radio"/> IFCAirToAirHeatRecovery		1
<input type="radio"/> IFCDamper		1
<input type="radio"/> IFCBuildingElementProxy		3
<input type="radio"/> IFCFan		2
<input type="radio"/> IFCCoil		3
<input type="radio"/> IFCDuctSegment		88
<input type="radio"/> IFCDuctFitting		88
<input type="radio"/> IFCAirTerminal		28
<input type="radio"/> IFCAirTerminalBox		5
<input type="radio"/> IFCPipeSegment		88
<input type="radio"/> IFCPipeFitting		88
<input type="radio"/> IFCValve		3
<input type="radio"/> IFCPump		1
<input type="radio"/> IFCSensor		14
<input type="radio"/> IFCFlowMeter		2

TGA-Schema

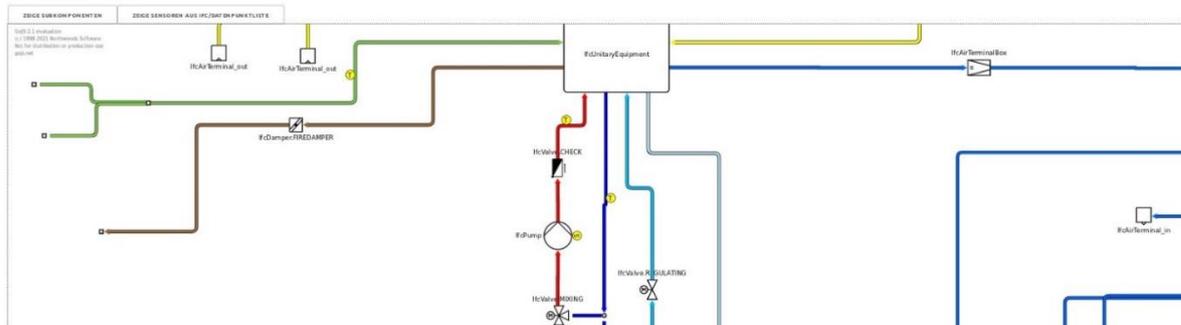


Abbildung 13: Übersicht über die verschiedenen Funktionalitäten von MoTive

TGA-Schema

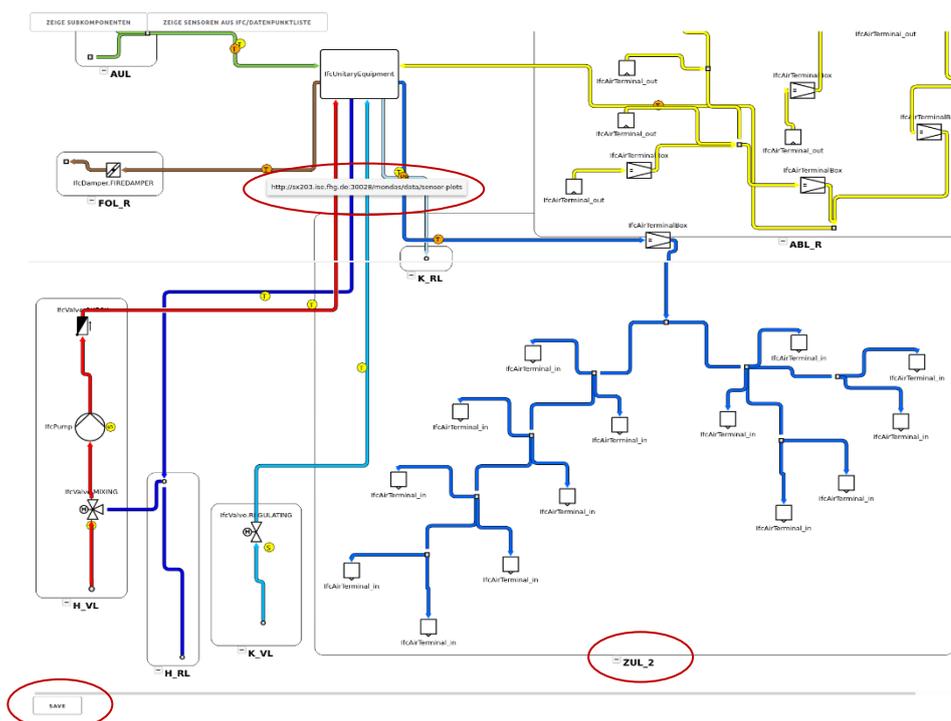


Abbildung 14: Detail-Ansicht einzelner Funktionalitäten von MoTive

3.1.3 MoTive – Anwendungsbeispiele

Die Entwicklung von MoTive erfolgte mit Hilfe eines initialen Testbeispiels, einer Lüftungsalage im Gebäude R am ISE. Im Verlauf des Projektes wurden zwei weitere Anwendungsfälle untersucht, ein Wärmeerzeugerverbund in Schramberg und die Wärmeversorgung des RIZ Energie in Offenburg.

Anwendungsfall Wärmeerzeugerverbund:

Die Wärmezentrale des Boardinghouse Gut Berneck am Standort Schramberg wurde von Fraunhofer ISE im Rahmen eines Unterauftrages mit dem Projektpartner Maurer in BIM modelliert (siehe Abbildung 15 und Abbildung 16).



Abbildung 15: Boardinghouse Gut Berneck am Standort Schramberg

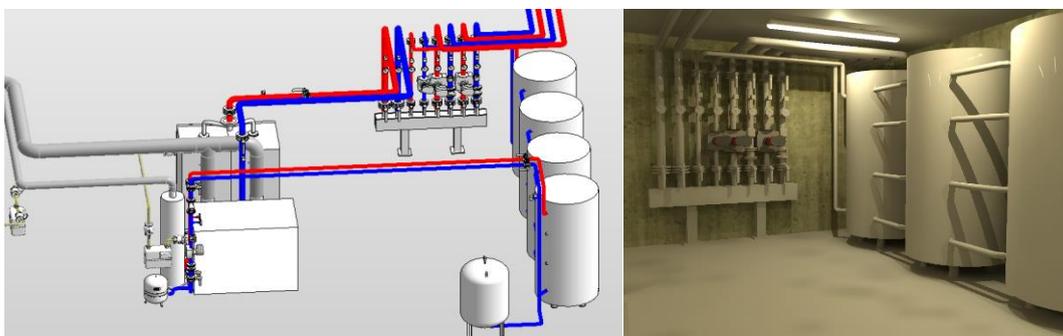


Abbildung 16: 3D Darstellung der Wärmezentrale

Anschließend wurde das BIM-Modell als IFC exportiert und in MoTive verwendet (siehe Abbildung 18). MoTive bietet eine übersichtliche Darstellung der vorhandenen Komponenten und deren Eigenschaften (Anlagenverzeichnis), die entsprechenden Prüfgrößen-Datensätze für jeden Anlagentyp aus der AMEV TMon und eine interaktive Visualisierung des Versorgungsschemas mit Einblendung der verbauten (gelb) und der nach AMEV erforderlichen (orange) Sensorik. Die einzelnen Sensoren im Anlagenschema wurde über die Datenpunktbezeichner mit Messdaten verknüpft, sodass beim Klicken auf einen Sensor die zugehörigen Zeitreihendaten in einem neuen Fenster angezeigt werden (siehe Abbildung 17).

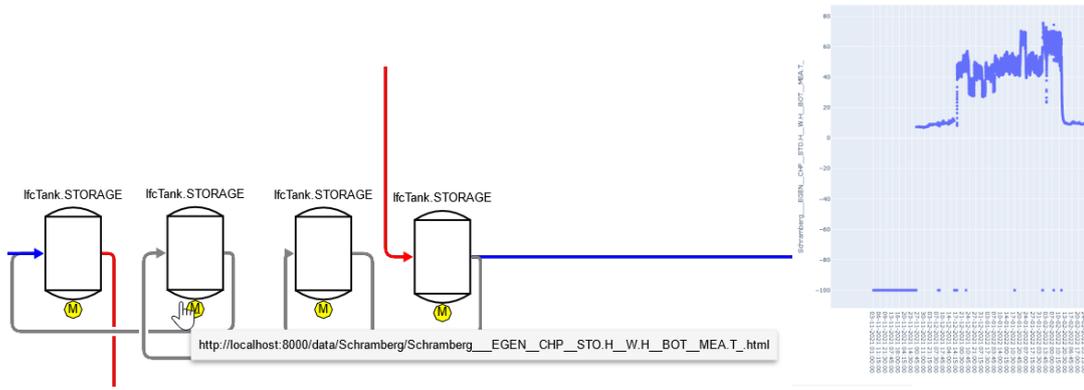


Abbildung 17: Verknüpfung von Sensoren in digitalem Schema mit Zeitreihendaten (rechts) über Link in Schema (links)

AMEV TMon Datensatz

Heizkreis x ▾

Nr.	Prüfgrößen	Zielwert	Messung	[Einheit]	Anmerkung
0	Außenlufttemperatur	-	Messung	[°C]	Ggf. zusätzlich für die Regelung notwendige Umrechnungen z.B. als gleitender Mittelwert
1	Vorlauftemperatur	Sollwert und Toleranz	Messung	[°C]	Zielwert ggf. als Kennlinie mit Toleranz
2	Rücklauftemperatur	Sollwert und Toleranz	Messung	[°C]	Zielwert ggf. als Kennlinie mit Toleranz
3	Betriebsmeldung der Umwälzpumpe	-	Messung	[0/1]	(optional) Prüfung von Dauerläufern bzw. fehlender Heizgrenze
4	Stellsignal (Drei-Wege)-Stellventil	-	Messung	[%]	(optional) Stellglied; witterungsgeführte Ventilöffnung: Zumischung durch Rücklauf manuell oder auch über einen elektrischen Antrieb regulierbar
5	Übertragene Wärmemenge	Höchstwert	Zählerstand	[kWh]	(optional)

Anlagenverzeichnis

ZEIGE DETAILS FÜR AUSGEWÄHLTE KOMONENTE

ZURÜCK ZUR ÜBERSICHT

Komponente	Anzahl
<input type="radio"/> IfcBoiler	1
<input type="radio"/> IfcPipeSegment	208
<input type="radio"/> IfcPipeFitting	124
<input type="radio"/> IfcLightFixture	6
<input type="radio"/> IfcTank	7
<input type="radio"/> IfcElectricGenerator	1
<input type="radio"/> IfcBuildingElementProxy	1
<input type="radio"/> IfcPump	5
<input type="radio"/> IfcValve	32
<input type="radio"/> IfcFilter	1
<input type="radio"/> IfcFlowMeter	5
<input type="radio"/> IfcSensor	12
<input type="radio"/> IfcFlowInstrument	10

TGA-Schema

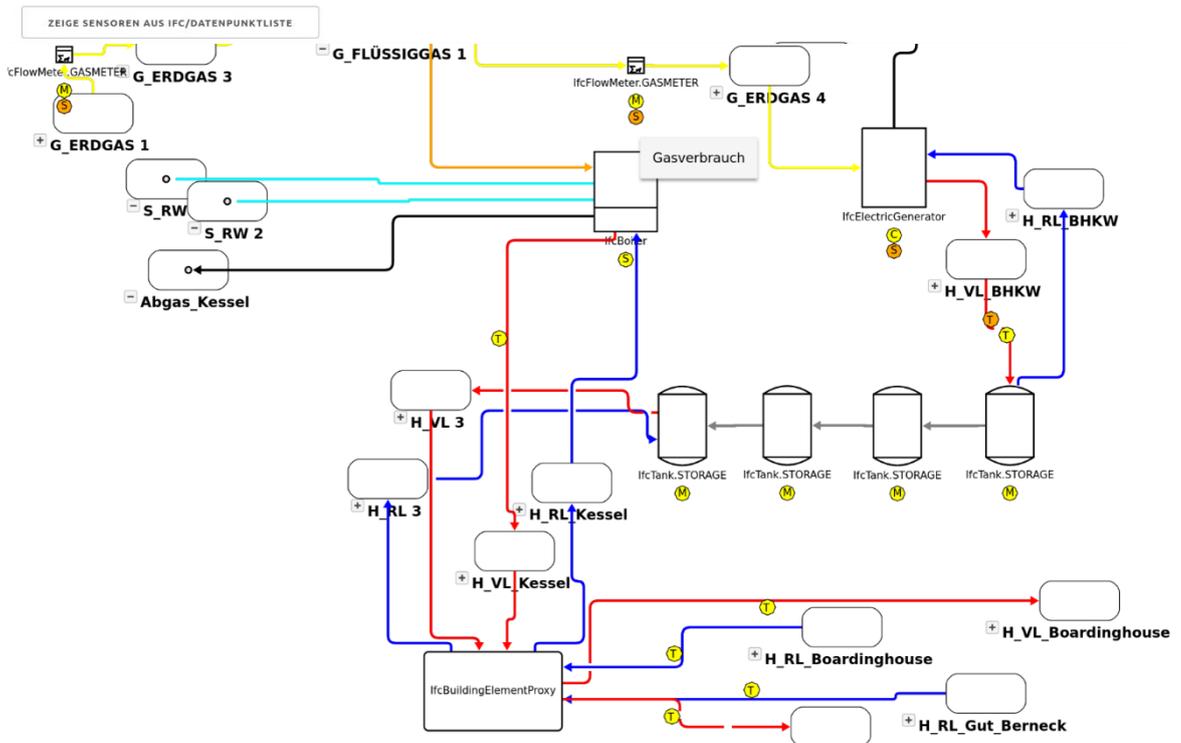


Abbildung 18: Das Werkzeug für MoTive für den Anwendungsfall eines Wärmeerzeuger-Verbundes

In einem weiteren Schritt wurde das Gebäude im Rahmen des Unterauftrags einer Betriebsanalyse unterzogen. Dafür wurde eine Datenpunktliste erstellt, die Daten wurden importiert und auf ihre Qualität überprüft. Anschließend wurde eine regelbasierte Analyse des Systems zur Fehlererkennung mit dem Tool „COMETH Rules“ durchgeführt und die Ergebnisse visualisiert. Analysiert wurden der Gaskessel, das BHKW und zwei Heizkreise. Dabei konnten Anomalien im Betrieb des Wärmeverbunds Schramberg festgestellt werden. Die Ergebnisse – beispielhaft zu sehen in Abbildung 19– wurden dem Projektpartner Maurer im Rahmen eines Berichts zur Verfügung gestellt.

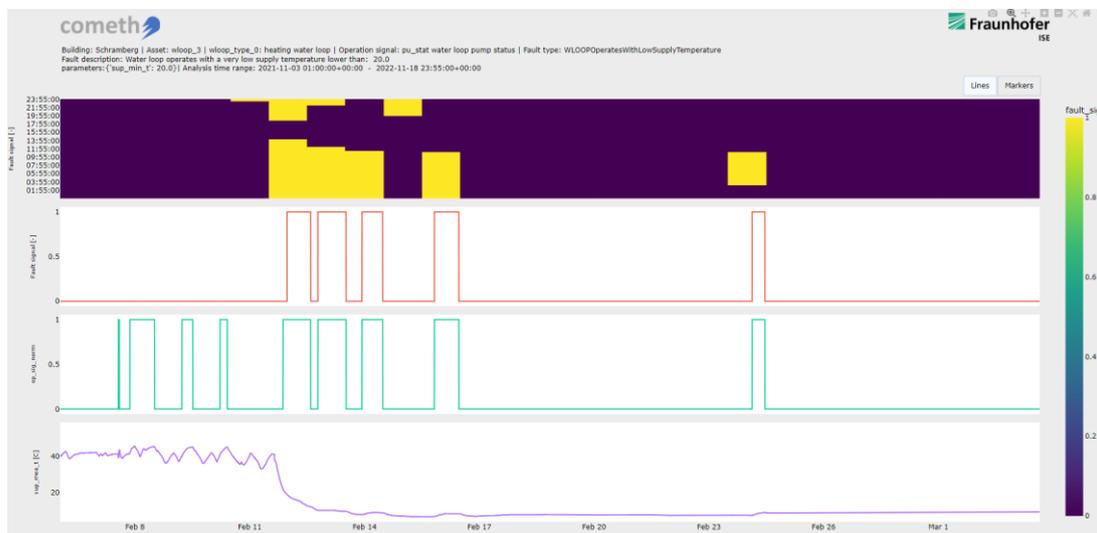


Abbildung 19: Visualisierung eines fehlerhaften Verhaltens eines Heizkreises (Vorlauftemperatur ist zu gering)

Anwendungsfall RIZ Energie:

Das von Solares Bauen bereitgestellte BIM(TGA)-Modell des RIZ Energie wurde seitens Fraunhofer ISE geprüft. Dabei fielen verschiedene Unzulänglichkeiten auf, die zurückgemeldet wurden. Beispielsweise gab es Inkonsistenzen in der Geschossbezeichnung, z.T. fehlende oder falsch bezeichnete Ventile und Pumpen oder fehlende Verknüpfungen zwischen Bauteilen. Die Tatsache, dass beim Export manche Bauteile nicht den korrekten IFC-Klassen zugeordnet werden, kann nur durch den Software-Hersteller der verwendeten CAD-Software (CATS) behoben werden. Da nicht absehbar war, wann und ob dies korrigiert werden kann, wurde vom Fraunhofer ISE eine Routine für eine entsprechende Nachprozessierung der IFC-Dateien erstellt. Im Anlagenverzeichnis und TGA-Schema werden somit beispielsweise Pumpen, Ventile und Wärmetauscher korrekt als solche ausgegeben (siehe Abbildung 20 und Abbildung 21).

AMEV TMon Datensatz

Anlagenverzeichnis

Kühkreis

VERGLEICHE MIT DATENPUNKTLISTE

Nr.	Prüfgrößen	Zielwert	Messung	[Einheit]	Anmerkung
0	Außenlufttemperatur	-	Messung	[°C]	Ggf. zusätzlich für die Regelung notwendige Umrechnungen z.B. als gleitender Mittelwert
1	Vorlauftemperatur	Sollwert und Toleranz	Messung	[°C]	Zielwert ggf. als Kennlinie mit Toleranz
2	Rücklauftemperatur	Sollwert und Toleranz	Messung	[°C]	Zielwert ggf. als Kennlinie mit Toleranz
3	Betriebsbelastung der Umwälzpumpe	-	Messung	[0/1]	(optional) Prüfung von Dauerläufern bzw. fehlender Heizgrenze
4	Stellsignal (2-Wege)-Durchgangsventil	-	Messung	[%]	(optional) Stellglied: witterungsgeführte Ventilöffnung; Zumschung durch Rücklauf manuell oder auch über einen elektrischen Antrieb regulierbar
5	Übertragene Wärmemenge	Höchstwert	Zählerstand	[kWh]	(optional)

ZEIGE DETAILS FÜR AUSGEWÄHLTE KOMponentE

ZURÜCK ZUR ÜBERSICHT

Komponente	Anzahl
<input type="radio"/> IfcPipeSegment	1294
<input type="radio"/> IfcDamper	499
<input type="radio"/> IfcSanitaryTerminal	34
<input type="radio"/> IfcDuctSegment	472
<input type="radio"/> IfcAirTerminal	69
<input type="radio"/> IfcDuctFitting	733
<input type="radio"/> IfcFlowInstrument	22
<input type="radio"/> IfcSpaceHeater	180

TGA-Schema

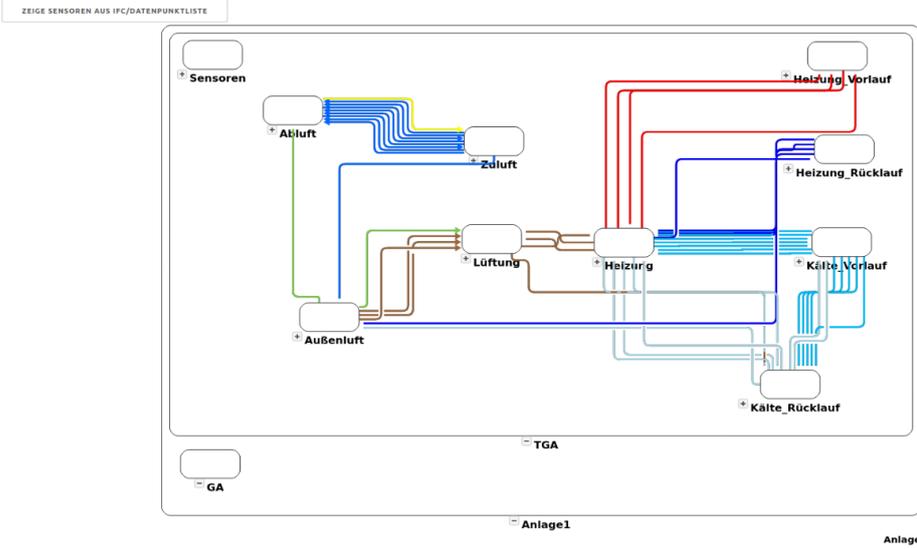


Abbildung 20: MoTive-Anwendung für das RIZ Energie

2	Rücklauftemperatur	Toleranz	Messung	[°C]	Zielwert ggf. als Kennlinie mit Toleranz
3	Betriebsbelastung der Umwälzpumpe	-	Messung	[0/1]	(optional) Prüfung von Dauerläufern bzw. fehlender Heizgrenze
4	Stellsignal (2-Wege)-Durchgangsventil	-	Messung	[%]	(optional) Stellglied: witterungsgeführte Ventilöffnung; Zumschung durch Rücklauf manuell oder auch über einen elektrischen Antrieb regulierbar
5	Übertragene Wärmemenge	Höchstwert	Zählerstand	[kWh]	(optional)

- IfcDuctSegment
- IfcAirTerminal
- IfcDuctFitting
- IfcFlowInstrument
- IfcValve
- IfcPump
- IfcSpaceHeater
- IfcHeatExchanger

TGA-Schema

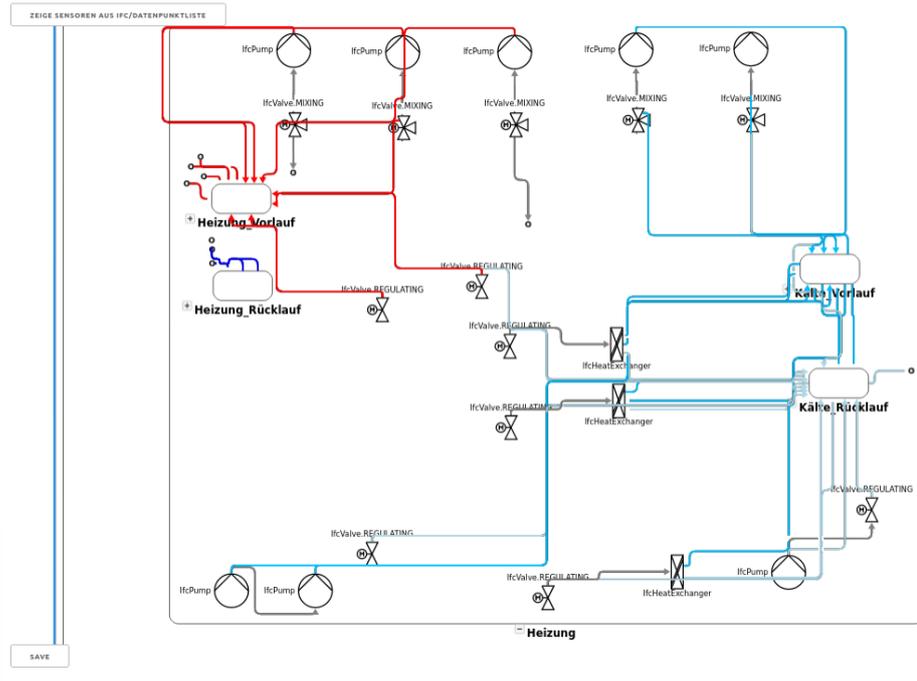


Abbildung 21: Darstellung in MoTive nach Anpassung der IFC-Klassen

3.1.4 MoTive – Alternative Datenquellen

Da über weitere Teile des Projektes keine geeignete IFC-Datei des Demonstrators (RIZ Energie) vorlag und unklar war, ob die oben beschriebenen Unzulänglichkeiten noch vor Projektende ausgeräumt werden können, wurde ein alternativer Ansatz erarbeitet, welcher keine IFC-Datei voraussetzt.

Generation von Anlagenschemata:

Die MoTive-Anwendung wurde dahingehend erweitert, dass ein digitales Anlagenschema, unabhängig von einer vorliegenden IFC-Repräsentation, eingebunden werden kann. Hintergrund für diese Erweiterung waren zum einen weiterhin bestehende Unzulänglichkeiten im IFC-Export des BIM- Modells des RIZ Energie und zum anderen die Tatsache, dass meistens in Bestandsgebäuden kein BIM existiert und die Erstellung eines BIM sehr aufwändig ist.

Aus diesem Grund wurde in der alternativen Vorgehensweise das digitale Anlagenschema automatisiert generiert. Der Ansatz für die Anlagengeneration stammt aus dem vom BMBF geförderten Forschungsprojekt DiBesAnSHK (FKZ: 02K20D010) und wurde für das vorliegende Beispiel geringfügig angepasst. Die grundsätzliche Funktionsweise des Anlagengenerators ist in Abbildung 22 schematisch dargestellt. In einer Konfigurationsdatei werden Angaben zu den Hauptkomponenten (Wärmeerzeuger, Übergabesysteme) gemacht und deren Anschlüsse spezifiziert. Auf Basis dieser Informationen werden dann im ersten Schritt mögliche Energieflussdiagramme für diese Komponenten erzeugt. Im zweiten Schritt wird für ein ausgewähltes Energieflussdiagramm ein valides Hydraulikschema erstellt. Dieses Hydraulikschema kann dann in Form eines Graphs aus Knoten und Kanten in der Anwendung MoTive verwendet werden.

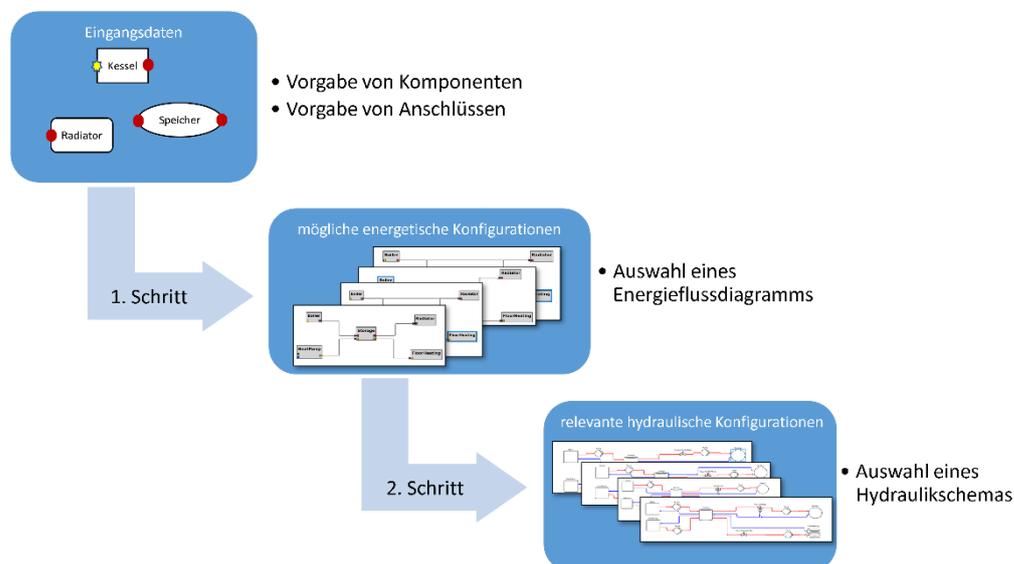


Abbildung 22: Grundsätzlicher Ansatz für die Generierung von Anlagenschemata aus dem Projekt DiBesAnSHK

In Abbildung 23 ist die initiale Konfiguration der Komponenten mittels einer Eingabe-GUI für das RIZ Energie gezeigt. Sie enthält die Typen der verbauten Komponenten, sowie deren (energetische) Anschlüsse. Dabei wurde nur die Wärme-/Kälteerzeugung berücksichtigt, nicht die Übergabesysteme, sowie die Lüftung. In Abbildung 24 ist eines der resultierenden Energieflussdiagramme gezeigt. Die gezeigte energetische Konfiguration entspricht der Umsetzung in der realen Anlage (siehe Abbildung 25). Das im zweiten Schritt generierte Hydraulikdiagramm enthält zusätzlich Pumpen, Ventile, Verzweigungen und Vor- und Rücklauf-Anbindungen (siehe Abbildung 26).

Es wird hier zunächst eine valide Konfiguration erzeugt, die jedoch ggf. nicht in allen Details der tatsächlich vorliegenden Konfiguration entspricht. Das zunächst automatisiert generierte Hydraulikschema für das RIZ Energie wurde in einem dritten Schritt so angepasst, dass Pumpen und Ventile den Planungsunterlagen entsprechen. Eventuelle Anpassungen müssen dazu manuell an der JSON-Datei vorgenommen werden (siehe Abbildung 27). Für das gegebene System im RIZ Energie wurden beispielsweise 2-Wege-Ventile manuell hinzugefügt, eine Pumpe vom Vorlauf in den Rücklauf verschoben und die hydraulischen Komponenten entsprechend ihrer Position Gruppen zugeordnet. Dies ermöglicht einerseits ein Ein- und Ausblenden einzelner Gruppen und andererseits eine automatisierte Lokalisierung der Sensoren und Verknüpfung zu den Prüfgrößen bei der späteren Einbindung in MoTive.

Das modifizierte Hydraulikschema kann dann in MoTive eingebunden werden (siehe Abbildung 28). Die Funktionalitäten von MoTive, wie Lokalisierung der Datenpunkte und Abgleich mit der AMEV TMon, bleiben für diesen Ansatz erhalten. Lediglich das Anlagenverzeichnis kann hier nicht ausgegeben werden, da, im Gegensatz zum IFC-Export, keine technischen oder geometrischen Eigenschaften zu den TGA-Komponenten hinterlegt sind. Auch die Verknüpfung zu den Messdaten über Hyperlinks ist weiterhin gegeben.

Konfiguration der Komponenten						
config_RIZ						
Name *	Typ *	Subtyp	Eingänge	Ausgänge	mehr Anschlüsse	Weitere Komponente
Grundwasser	Grundwasser			Brunnenwasser		
Wärmepumpe	Wärmepumpe		Strom	Heizwasser		
Speicher	Heizwasserspeicher		Kühlwasser	Heizwasser		
Verteiler 1	Verteiler		Heizwasser	Heizwasser		
			Kühlwasser	Kühlwasser		
Verteiler 2	Verteiler		Heizwasser	Heizwasser		
			Kühlwasser	Kühlwasser		
WT 1	Wärmetauscher		Brunnenwasser	Kühlwasser		
WT 2	Wärmetauscher		Brunnenwasser	Kühlwasser		
WT 3	Wärmetauscher		Brunnenwasser	Kühlwasser		
HKK1	HeizKühlkreis	Mischkreis	Heizwasser			
			Kühlwasser			
HKK2	HeizKühlkreis	Mischkreis	Heizwasser			
			Kühlwasser			
HK	Heizkreis	Mischkreis	Heizwasser			
KK1	Kühlkreis	Mischkreis	Kühlwasser			
KK2	Kühlkreis	Mischkreis	Kühlwasser			

exportiere JSON

Abbildung 23: Erstellung der Konfigurationsdatei für den Anlagengenerator mittels einer GUI

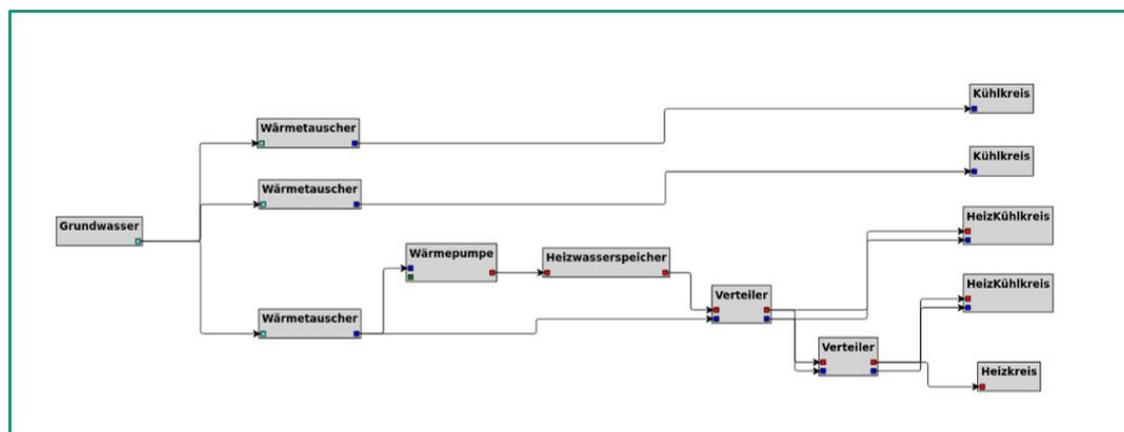


Abbildung 24: Automatisiert generiertes Energieflussdiagramm für das RIZ Energie

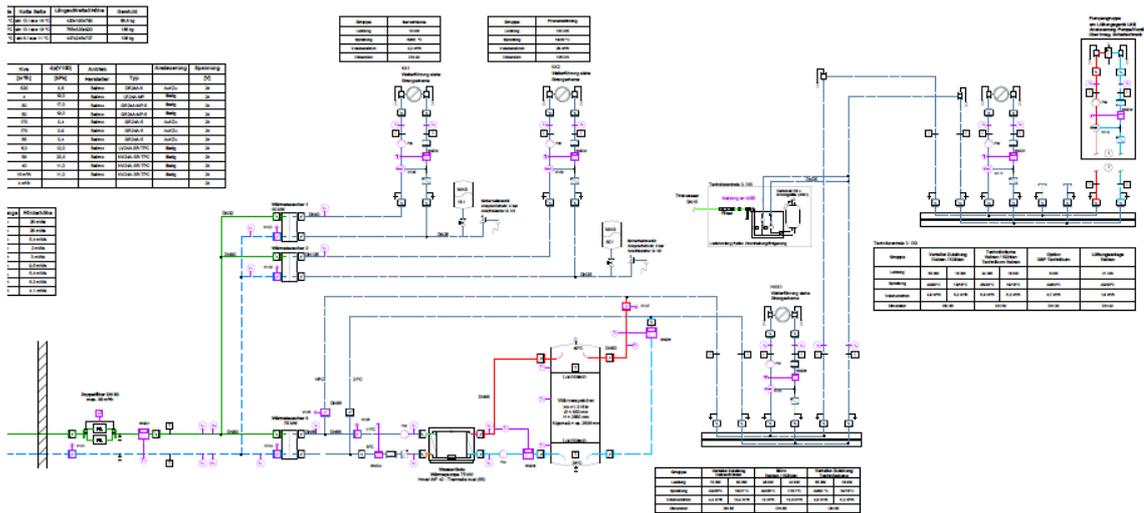


Abbildung 25: Übersicht des Wärmeversorgungsschemas für das RIZ Energie

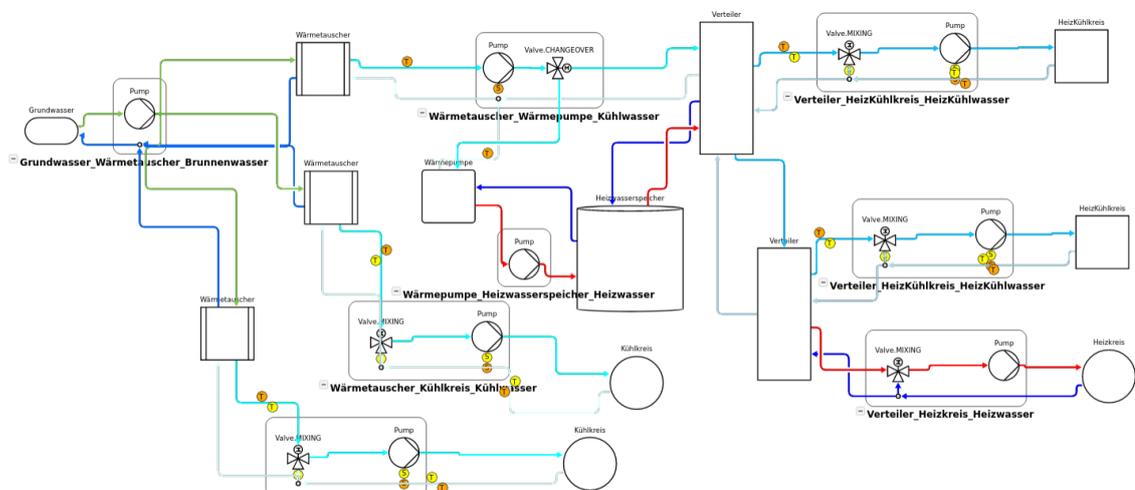


Abbildung 26: Initial generiertes Hydraulikschema durch den Anlagengenerator

```

270  {
271    "key": "r_l_2",
272    "category": "PipeSegment",
273    "text": "r_l_2",
274    "pos": "-638.4577956900599 574.9349988632648",
275    "group": "WT_1_KK1_Kühlwasser"
276  },
277  {
278  },
279  {
280    "key": "p_2",
281    "category": "Pump",
282    "text": "p_0_5",
283    "pos": "-542.1752693856682 779.2361408604468",
284    "group": "WT_1_KK1_Kühlwasser"
285  },
286  {
287    "key": "v_3",
288    "category": "Valve.MIXING",
289    "text": "v_0_9",
290    "pos": "-852.2364284160817 53.14930929311925",
291    "group": "WT_2_KK2_Kühlwasser"
292  },
293  {
294    "key": "r_l_3",
295    "category": "PipeSegment",
296    "text": "r_l_3",
297    "pos": "-804.9230865920451 -76.58824073616496",
298    "group": "WT_2_KK2_Kühlwasser"
299  },
300  {
301    "key": "p_3",
302    "category": "Pump",
303    "text": "p_0_0",
304    "pos": "-1000.0 -10.634862384875143",
305    "group": "WT_2_KK2_Kühlwasser"
306  },
307  {
308    "key": "p_5",
309    "category": "Pump",
310    "text": "p_0_4",
311    "pos": "2.2248524436316717 -368.4391991392283",

```

Abbildung 27: Ausschnitt aus dem digitalen Hydraulikschema für das RIZ Energie im JSON-Format

AMEV TMon Datensatz

Kategorie				
Hydraulisch mit Datenpunktliste				
ID	Bezeichnung	Kategorie	Prozess	Standard-Beschreibung
1	Jahresluftwärmepumpe	Wärmepumpe	Heizung	Obj. "Heizung" für die Regelung von Wärmeenergie, z.B. als elektrischer Heizkörper
2	Verteilungspumpe	Verteiler und Pumpe	Heizung	Zirkuliert ggf. als Heizwasser im Verteiler
3	Wärmepumpe	Verteiler und Pumpe	Heizung	Zirkuliert ggf. als Heizwasser im Verteiler
4	Wärmepumpe	Verteiler und Pumpe	Heizung	Zirkuliert ggf. als Heizwasser im Verteiler
5	Wärmepumpe	Verteiler und Pumpe	Heizung	Zirkuliert ggf. als Heizwasser im Verteiler
6	Wärmepumpe	Verteiler und Pumpe	Heizung	Zirkuliert ggf. als Heizwasser im Verteiler
7	Wärmepumpe	Verteiler und Pumpe	Heizung	Zirkuliert ggf. als Heizwasser im Verteiler
8	Wärmepumpe	Verteiler und Pumpe	Heizung	Zirkuliert ggf. als Heizwasser im Verteiler
9	Wärmepumpe	Verteiler und Pumpe	Heizung	Zirkuliert ggf. als Heizwasser im Verteiler
10	Wärmepumpe	Verteiler und Pumpe	Heizung	Zirkuliert ggf. als Heizwasser im Verteiler
11	Wärmepumpe	Verteiler und Pumpe	Heizung	Zirkuliert ggf. als Heizwasser im Verteiler
12	Wärmepumpe	Verteiler und Pumpe	Heizung	Zirkuliert ggf. als Heizwasser im Verteiler
13	Wärmepumpe	Verteiler und Pumpe	Heizung	Zirkuliert ggf. als Heizwasser im Verteiler
14	Wärmepumpe	Verteiler und Pumpe	Heizung	Zirkuliert ggf. als Heizwasser im Verteiler
15	Wärmepumpe	Verteiler und Pumpe	Heizung	Zirkuliert ggf. als Heizwasser im Verteiler
16	Wärmepumpe	Verteiler und Pumpe	Heizung	Zirkuliert ggf. als Heizwasser im Verteiler
17	Wärmepumpe	Verteiler und Pumpe	Heizung	Zirkuliert ggf. als Heizwasser im Verteiler
18	Wärmepumpe	Verteiler und Pumpe	Heizung	Zirkuliert ggf. als Heizwasser im Verteiler
19	Wärmepumpe	Verteiler und Pumpe	Heizung	Zirkuliert ggf. als Heizwasser im Verteiler
20	Wärmepumpe	Verteiler und Pumpe	Heizung	Zirkuliert ggf. als Heizwasser im Verteiler

TGA-Schema

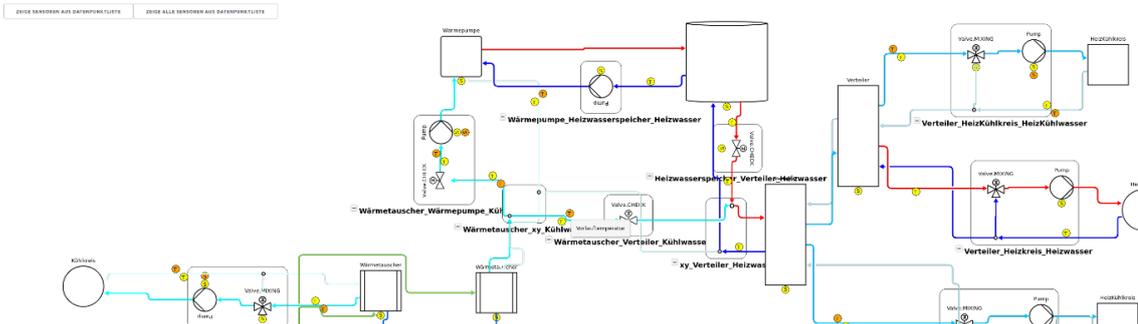


Abbildung 28: Einbindung des generierten und angepassten Hydraulikschemas für das RIZ Energie in MoTive

Es besteht somit die Möglichkeit, MoTive auch in Anwendungsfällen zu verwenden, in welchen kein BIM-Modell vorliegt. Anstelle einer aufwändigen nachträglichen BIM-Modellierung kann in diesem Fall eine Generation des hydraulischen Schemas auf Basis von Angaben über die enthaltenen Komponenten erfolgen (siehe [7]) und das generierte Schema als Datenquelle für MoTive dienen. Die Sensoren müssen nicht initial im Modell positioniert werden (was in CAD-Tools sehr mühsam und fehleranfällig ist), sondern können aus der Datenpunktliste automatisiert übernommen und positioniert werden.

Einlesen von Datenpunktlisten:

Die von einer Anlage aufgenommenen Messdaten werden typischerweise in einer Datenpunktliste spezifiziert. Diese enthält eine ID/Bezeichnung und in der Regel eine kurze textuelle Beschreibung jedes Datenpunktes. Eine Modellierung der entsprechenden Sensoren in einem BIM-Modell ist grundsätzlich möglich, jedoch oftmals sehr zeitaufwändig, fehleranfällig und teilweise nach einem IFC-Export nicht unmittelbar verwertbar. Letzteres liegt daran, dass die Sensoren über ihre geometrischen Positionen an den zu messenden Komponenten „angebracht“ werden und nicht über ihre topologische/funktionale Position.

Aus diesem Grund wurde eine Möglichkeit vorgesehen, Datenpunktlisten direkt (z.B. als CSV-Datei), unabhängig von einem BIM, in MoTive zu importieren. Die Zuordnung zum Anlagenschema erfolgt mittels einer neuen, einheitlichen Kennzeichnung, die jeden Datenpunkt eindeutig einer Komponente oder einem Subsystem (einer hydraulischen Gruppe) zuordnet.

Beispielsweise erhält eine gemessene Temperatur im unteren Segment des Speichers folgende Kennzeichnung:

`Schramberg__STORAGE_STO.H__BOT__MEA.T`

Die in Abbildung 29 gezeigten Pumpen P1 und P2 erhalten die folgenden Bezeichnungen:

P1: `Schramberg__GEN_CHP__STORAGE_STO.H__PUMP__HW__RET__STAT.ON`

P2:
`Schramberg__STORAGE_STO.H__DISTRIBUTION_DIST.H__PUMP__HW__RET__STAT.ON`

Im Gegensatz zu gängigen Bezeichnungssystematiken wird hier sowohl die Quelle als auch die Senke des Energieflusses im Bezeichner berücksichtigt.

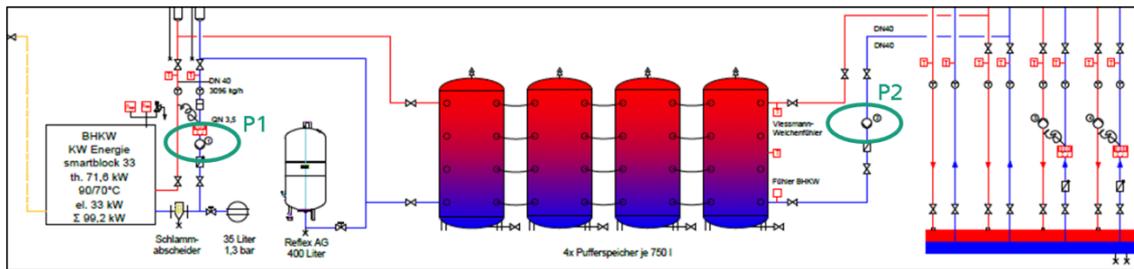


Abbildung 29: Beispiel für Pumpen im TGA-Schema, um die verwendete Bezeichnungssystematik zu illustrieren

Bei dieser Kennzeichnung wird bisher nicht die genaue Lokalisierung innerhalb des Subsystems spezifiziert. Diese Thematik soll in einem Nachfolgeprojekt untersucht werden.

3.1.5 MoTive – Zusammenfassung und Fazit

Das im Projekt entwickelte Werkzeug MoTive bringt Informationen, die für die Implementierung eines technischen Monitorings nach der AMEV-TMon notwendig sind, aus verschiedenen Datenquellen in digitaler Form zusammen und erschließt somit Zusammenhänge, die andernfalls Monitoring-Dienstleister mühsam manuell herstellen und prüfen müssen. Die Inbetriebnahme gebäudetechnischer Anlagen und Prozesse der energetischen Betriebsoptimierung können somit durch die Bereitstellung digitaler Daten vereinfacht werden. MoTive wurde prototypisch an unterschiedlichen Anwendungsfällen demonstriert und validiert (Technologie-Reifegrad/TLR³: 6/7).

Im Rahmen des Projekts BUiLD.DIGITIZED wurden verschiedene Funktionalitäten in MoTive implementiert und anhand mehrerer Praxis-Beispiele, einer RLT-Anlage in Freiburg, einem Wärmeerzeugerverbund in Schramberg und der Wärmeversorgung des RIZ Energie in Offenburg, getestet. MoTive extrahiert Informationen zu Sensoren und Aktoren, die für die Realisierung eines technischen Monitorings relevant sind, aus einer BIM-Planung (IFC-Datei) und verknüpft diese Informationen mit den in der AMEV-TMon definierten Prüfgrößen-Datensätzen für verschiedene TGA-Anlagen. Die Informationen aus unterschiedlichen Quellen werden in einer Web-Applikation mit einem interaktiven Werkzeug zusammengeführt. Auf Basis der AMEV-Prüfgrößen kann ein automatischer Sensorabgleich zwischen geplanten/vorhandenen und den nach der AMEV-TMon vorgeschriebenen Sensoren durchgeführt werden. Dazu kann MoTive genutzt werden, um sich einen Überblick über die im FC vorhandenen Anlagen und deren Zusammenhänge zu verschaffen. Eventuelle Unzulänglichkeiten in der Modellierung können so aufgedeckt werden und die Plausibilität der Zusammenhänge kann überprüft werden.

Das Werkzeug kann somit zum Prüfen einer IFC-Datei eingesetzt werden. Darüber hinaus stellt das extrahierte Anlagenverzeichnis inklusive aller hinterlegten Informationen über die einzelnen Komponenten einen Teil der Inbetriebnahme-Dokumentation dar. Es kann als digitale Checkliste eingesetzt werden, um eine Inbetriebnahme nach VDI 6039 digital zu unterstützen. Die Sensoren können außerdem im Anlagenschema über die eindeutigen Datenpunktbezeichner mit den zugehörigen Zeitreihendaten verknüpft werden.

³ https://de.wikipedia.org/wiki/Technology_Readiness_Level

Die Anwendung eines Tools, welches parallel im Projekt DiBesAnSHK (FKZ: 02K20D010) am Fraunhofer entwickelt wurde, ermöglicht außerdem die Nutzung von MoTive ohne das Vorliegen eines BIM, indem eine alternative Datenquellen für die Erstellung des Anlagenschemas genutzt wird, und erhöht somit den Anwendungsbereich des Tools für Anlagen und Gebäude ohne detaillierte BIM-Planung.

Aktuell gibt es bei der automatisierten Sensor-Lokalisation noch Zwischenschritte, die manuell erfolgen müssen (z.B. Vergabe von geeigneten Bezeichnungen). Diese Thematik soll in einem Nachfolgeprojekt adressiert werden.

3.2 Fehlererkennung bei der Inbetriebnahme

Fehler sind Zustände oder Ereignisse im Gebäudebetrieb, die ein gleichzeitiges Erreichen von behaglichem Raumklima und dessen energieeffizienter Bereitstellung grundsätzlich verhindern. Fehler können ihre Ursache in mangelhafter Planung, Ausführung, falscher Bedienung oder fehlender Wartung haben [8]. Typische Fehler im Gebäudebetrieb sind z.B.:

- Fehler- und mängelbehaftete Steuerung / Regelungen
- Inkorrekte Verschaltung der Wärme-, Kälteerzeugung
- Unzureichende Messtechnik und Datenerfassung
- Fehler in Messtechnik
- Schäden der hydraulischen Systeme
- Falsche Dimensionierung

Fehlererkennung und -diagnose (FED) zielt auf eine frühzeitige, systematische und - soweit möglich - automatisierte Erkennung und Diagnose von Fehlern ab, bevor zusätzliche Schäden oder ein Versagen von Teilen oder dem Gesamtsystem auftreten. Dies wird durch eine Kombination von kontinuierlichem Monitoring und Auswertung der Signale im Hinblick auf Fehler erreicht. FED ist eine notwendige Voraussetzung, um einen fehlerfreien Betrieb zu erreichen und wird daher der Optimierung vorgelagert. Somit ergibt sich ein zweistufiger Prozess, der schematisch in Abbildung 30 dargestellt ist [8].

Der Prozess startet ausgehend von einer Datenerfassung, die im Idealfall Bestandteil der Gebäudeautomation ist und Informationen aus dem Gebäude in Form von Messdaten, Sollwerten oder Statusinformationen liefert.

Daran schließt sich auf der ersten Stufe zunächst die Fehlererkennung und –Diagnose an. Die Fehlererkennung kann sowohl manuell (z.B. durch das Bedienpersonal) oder automatisiert geschehen. Bei Detektion eines Fehlers im Betrieb ist zunächst eine Fehlerdiagnose im Sinne einer Ursachenermittlung durchzuführen. Auch dieser Prozess kann sowohl manuell als auch automatisiert geschehen. Wird der Fehler als kritisch bewertet, erfolgt anschließend die Fehlerbeseitigung. Ob ein Fehler als kritisch einzustufen ist, hängt von den jeweils gegebenen Randbedingungen bezüglich Energie, Kosten und Raumklima bzw. von deren Gewichtung durch den Gebäudebetreiber oder –Besitzer ab.

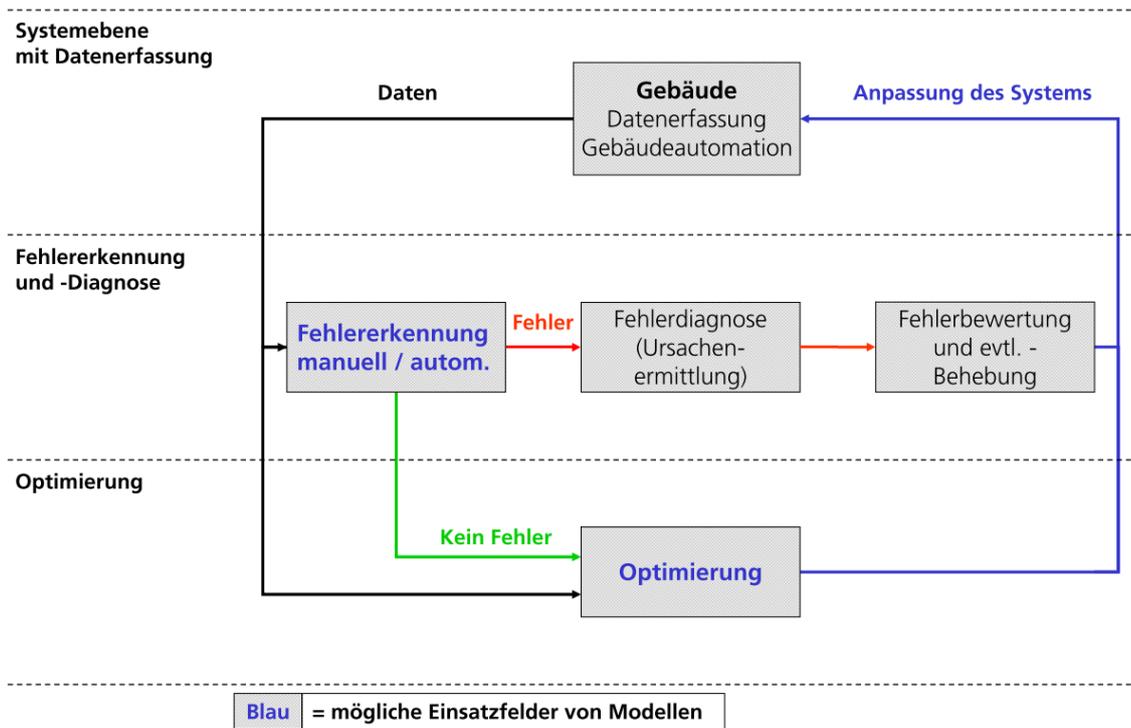


Abbildung 30 Prozessstruktur bei Fehlererkennung und Optimierung im Gebäudebetrieb [8]

Wenn alle kritischen Fehler beseitigt sind, kann die Optimierung erfolgen, um Vorgaben für Sollwerte des Anlagenbetriebs zu erzeugen. Vor der Einspeisung dieser Sollwerte in die Gebäudeautomation sollte eine Plausibilitätsprüfung erfolgen, um zu überprüfen ob alle Anforderungen berücksichtigt wurden und um zu hinterfragen ob alle gestellten Anforderungen vernünftig und plausibel sind. Entscheidend für einen energieeffizienten Betrieb über die gesamte Lebensdauer eines Gebäudes ist, dass dieser Prozess kontinuierlich bzw. regelmäßig durchlaufen wird, um evtl. auf Änderungen zu reagieren. Diese Änderungen können gewollt sein (z.B. Sanierung des Gebäudes, Umbau eines Gebäudeteils) als auch ungewollt (z.B. Degradation eines Energieerzeugers aufgrund eines Fehlers) [8].

3.2.1 Manuelle Fehlererkennung

Abbildung 31 zeigt in einem vereinfachten Schema die beiden Betriebsmodi des Heizungs-, Lüftungs- und Klimatechnik-Systems des Gebäudes. Links ist das Schema für den Heizbetrieb im Winter und rechts das Schema für den Kühlbetrieb im Sommer abgebildet. In beiden Schemata wird ersichtlich, dass Server- und Prozesskühlung das ganze Jahr zur Verfügung stehen müssen. Der wesentliche Unterschied besteht in den TABS. Im Kühlbetrieb wird das Wasser direkt über einen Wärmetauscher zu den TABS gefördert, während es im Heizbetrieb über eine Wärmepumpe in den Wärmespeicher gelangt und von dort in die TABS fließt. Es wurden zwei unterschiedliche Lagen der Rohrregister in den Betondecken der Büros verbaut: Ein Rohrregister in Mittellage für die Bereitstellung der Grundlast, die nachts zum Einsatz kommt und ein Rohrregister in oberflächennaher Lage für die flexible Nachregelung, die tagsüber betrieben wird und.

Die Vorlauftemperatur der TABS und damit die Raumtemperaturen werden mit einer außentemperaturgeführten Heiz- und Kühlregelung (Heiz- und Kühlkurven) gesteuert. Diese Kurven geben im Wesentlichen an, wie hoch die Vorlauftemperatur des TABS in Abhängigkeit des gleitenden Mittelwerts der Außentemperatur sein soll.

Diese Punkte müssen in der GLT des Gebäudes in Abhängigkeit von der Betriebsart (Heizen oder Kühlen) und Gebäudeteil (Büro oder Technikum) definiert werden. Im Wesentlichen steuern sie ein Mischventil im TABS-Kreislauf. Dieses Drei-Wege-Ventil regelt die Temperatur des Wassers, das aus dem Wärmespeicher (im Heizbetrieb) oder direkt aus dem Wärmetauscher der Grundwasserpumpen (im Kühlbetrieb) kommt, um die erforderliche Vorlauftemperatur im Kreislauf zu erreichen.

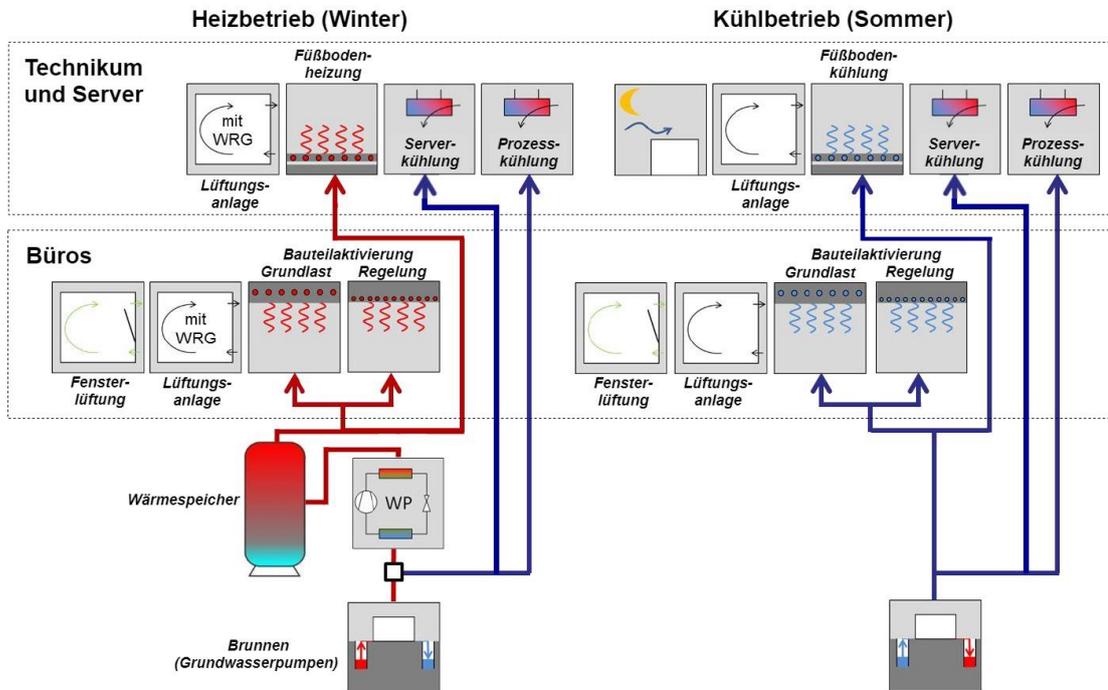


Abbildung 31 Betriebsmodi des RIZ Energie: Heizbetrieb (links) und Kühlbetrieb (rechts).

In Abbildung 32 sind die Komfortdiagramme der drei Etagen des RIZ Energie dargestellt. Die Temperaturen der Übergangsmonate (März bis Mai) sind jeweils in violett dargestellt.

Diese Diagramme konnten zur Fehlererkennung verwendet werden, da die Auslegung des Kühl- und Heizungssystems nach den Grenzwerten des Komfortbereichs II der EN 16798 erfolgt ist. Somit sollten die Raumtemperaturen im Normalbetrieb innerhalb der Komfortgrenzen liegen. Es sind nur die Temperaturen innerhalb der Anwesenheitszeiten (Mo-Fr, 8-18 Uhr) dargestellt.

Um eine Fehlerdiagnose zu erstellen, wurde die gesamte Kette des Heizungssystems (TABS, Wärmespeicher und Wärmepumpe) und die Zeiträume, in denen diese extrem hohen Temperaturen auftraten, analysiert.

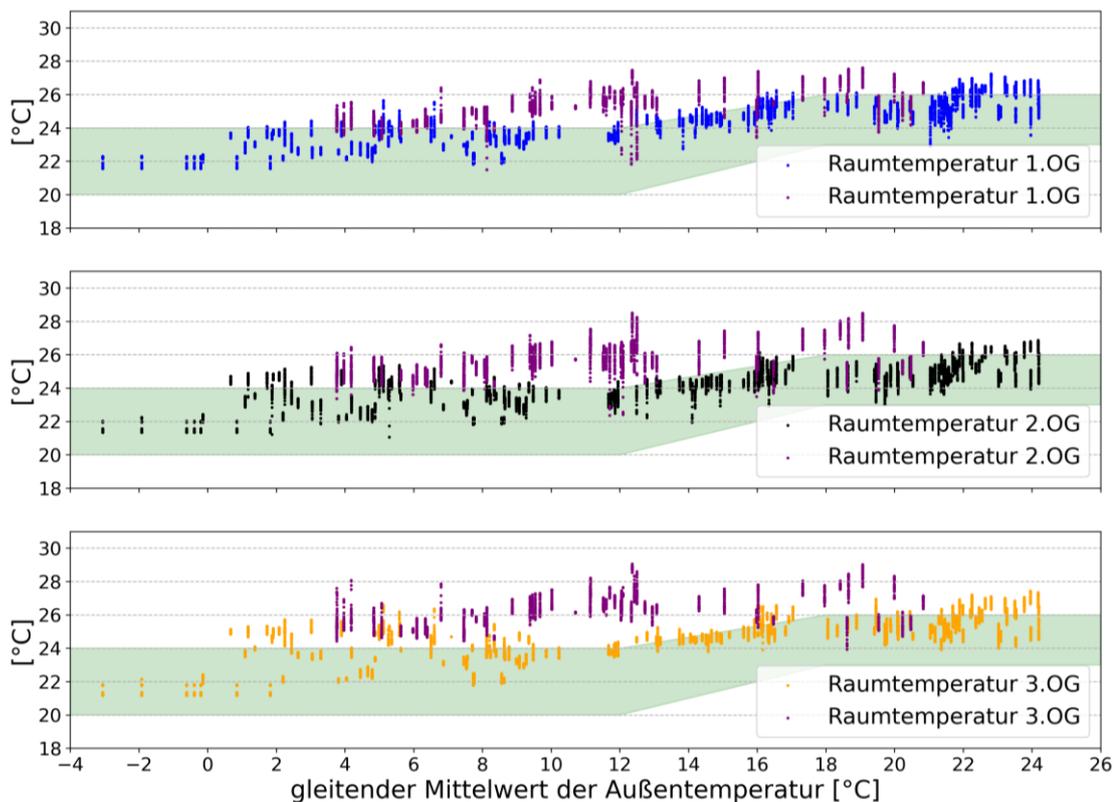


Abbildung 32 Komfortauswertung nach DIN EN 15251 mit gemessenen Daten. Zeitraum: Januar bis Dezember 2022

Bei der manuellen Fehlerdiagnose muss durch Einsicht von Messdaten, insbesondere der Zeitreihen, die Fehlerquelle ermittelt werden. In diesem Fall liegt ein Fehler vor, da die Raumtemperaturen außerhalb der Komfortgrenzen liegen.

Im ersten Schritt wurden daher die Temperaturen im Übergabesystem, also die Vorlauftemperaturen der TABS, geprüft. Im Folgenden werden dabei die Messdaten im April 2022 als exemplarische Daten für den Übergangsbetrieb und die Messdaten im Dezember 2022 als exemplarische Daten für den Heizbetrieb herangezogen und verglichen. Abbildung 33 zeigt die Zeitreihen der Vor- und Rücklauftemperaturen und der Raumtemperatur im 2.OG für den Monat April. Beim Vergleich mit Abbildung 32 fällt auf, dass die Raumtemperaturen außergewöhnlich hoch sind und sich außerhalb des zu erwartenden Komfortbereichs von ca. 20-24°C befinden. Es kann noch keine Aussage darüber getroffen werden wann die Raumtemperaturen den Komfortbereich verlassen, da dazu der gleitende Mittelwert der Außentemperatur betrachtet werden muss.

Aus der Abbildung 33 geht weiterhin hervor, dass die Vor- und Rücklauftemperaturen sehr nah beieinander liegen und beide Temperaturen unterhalb der Raumtemperatur liegen, obwohl der Gebäudebetrieb sich zu diesem Zeitpunkt im Heizbetrieb befand (wobei der Übergangsbetrieb im Wesentlichen dem Heizbetrieb entspricht, abgesehen von der Aktivierung des Sonnenschutzes). Die TABS-Temperaturen sind dabei zeitlich gefiltert und werden somit nur für die Zeiträume eingeblendet, in denen die entsprechende Umwälzpumpe aktiv war.

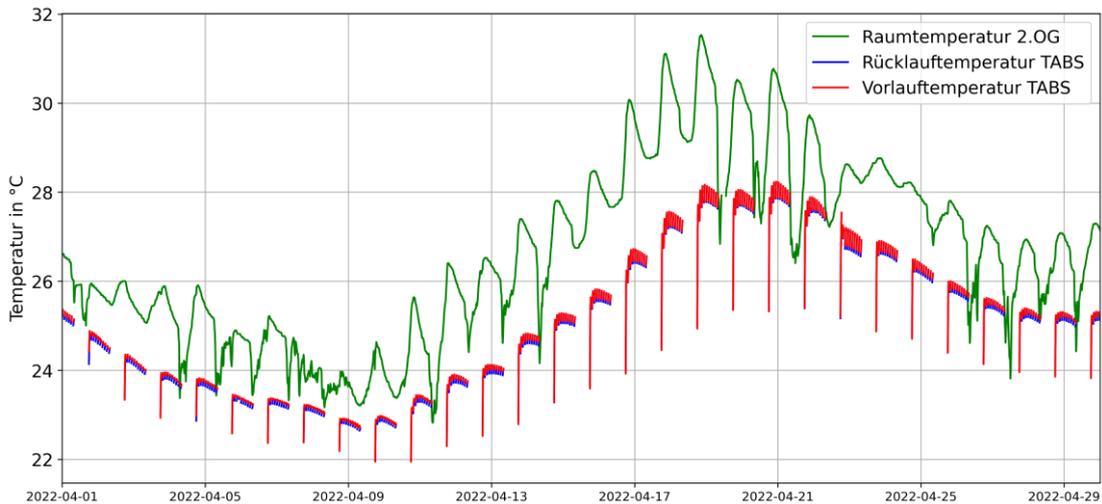


Abbildung 33 Raumtemperatur im 2.OG und Vor- und Rücklauftemperatur der TABS im April 2022

Um weiterhin zu ergründen, warum die Vor- und Rücklauftemperaturen der TABS beinahe identisch sind, wird in Abbildung 34 eine Vergrößerung der Abbildung 33 betrachtet. Hier fällt auf, dass die TABS jeweils einen kurzen Zeitraum von 30 Minuten aktiv sind und anschließend ausgeschaltet werden. Dies geschieht ausschließlich im Nachtbetrieb (zwischen 18 und 8 Uhr) und wiederholt sich alle 60 Minuten. Diese Beobachtungen stimmen mit den Raumtemperaturregelungsparametern für die Bauteilaktivierung und Fußbodenheizung/-kühlung in den Bürobereichen gemäß der Funktionsbeschreibung überein. Hier wird definiert, dass die TABS im Nachtbetrieb ausgeschaltet werden sollen, wenn eine Temperaturspreizung von weniger als 1 K (zwischen Vor- und Rücklauftemperatur) erreicht wird. Im Anschluss soll eine Sperrzeit von 60 Minuten ablaufen bevor die Ventile der TABS wieder geöffnet werden. Nach jedem erneuten Öffnen soll mindestens eine Zeit von 30 Minuten verstreichen bevor die Ventile wieder geschlossen werden können. In Abbildung 34 ist genau dieses Ein- und Ausschaltverhalten zu beobachten. Hier sind die Betondecke und der Raum jedoch bereits auf einer so hohen Temperatur, dass durch die TABS keine Wärme mehr zugeführt werden kann. Aus diesem Grund gleichen sich die Vor- und Rücklauftemperatur.

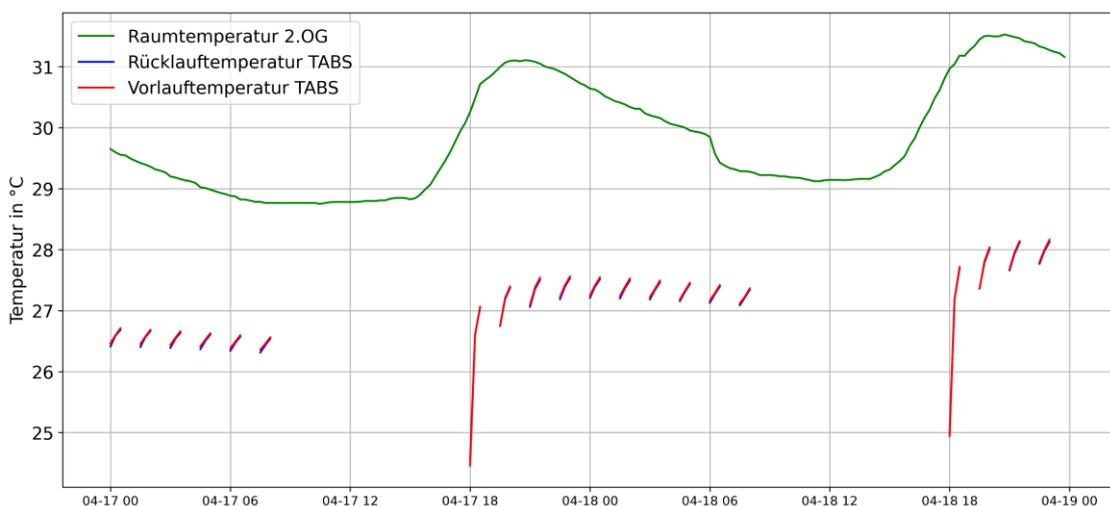


Abbildung 34: Zeitreihen des TABS Betriebs für 3 Tage

Stellt man für denselben Zeitraum die Zeitreihe der Raumtemperatur und der Globalstrahlung gegenüber (siehe Abbildung 35) wird ersichtlich, dass der Temperaturanstieg mit der zunehmenden Globalstrahlung zusammenhängen könnte.

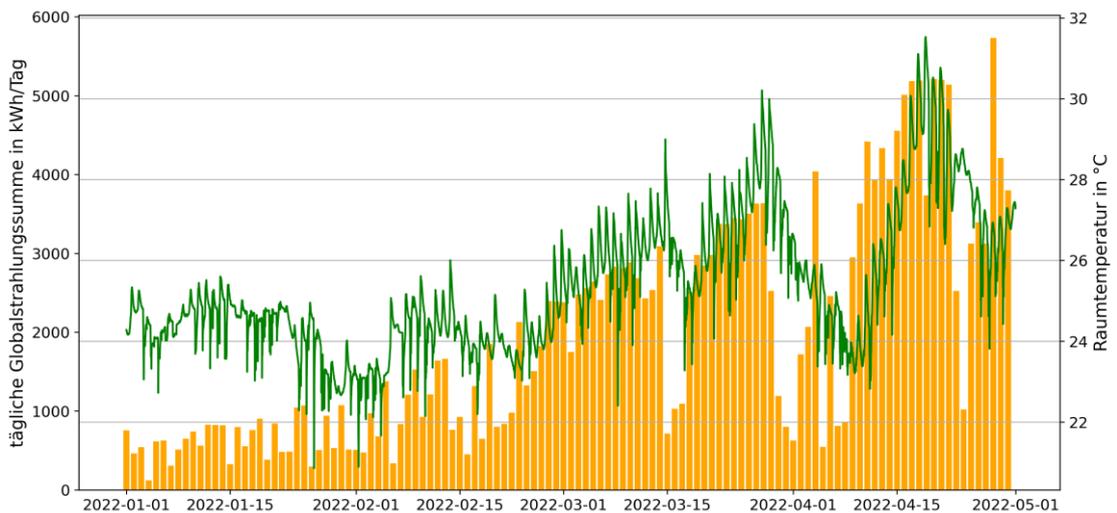


Abbildung 35: Zeitreihe der Raumtemperatur und Summe der täglichen Globalstrahlung von Januar bis April 2022

Dieser Zusammenhang wird noch deutlicher, wenn man die durchschnittliche Raumtemperatur und die tägliche Summe der Globalstrahlung in einem Streudiagramm direkt gegenüberstellt (siehe Abbildung 36). Hier erkennt man eindeutig eine positive Korrelation zwischen den beiden Größen. Im erwarteten Betrieb sollte die Raumtemperatur unabhängig von der Globalstrahlung konstant innerhalb der Komfortgrenzen liegen. Um das zu gewährleisten wird der Sonnenschutz durch Lamellenjalousien automatisiert gesteuert. Im nächsten Schritt soll daher der Betrieb der Jalousiensteuerung näher betrachtet werden.

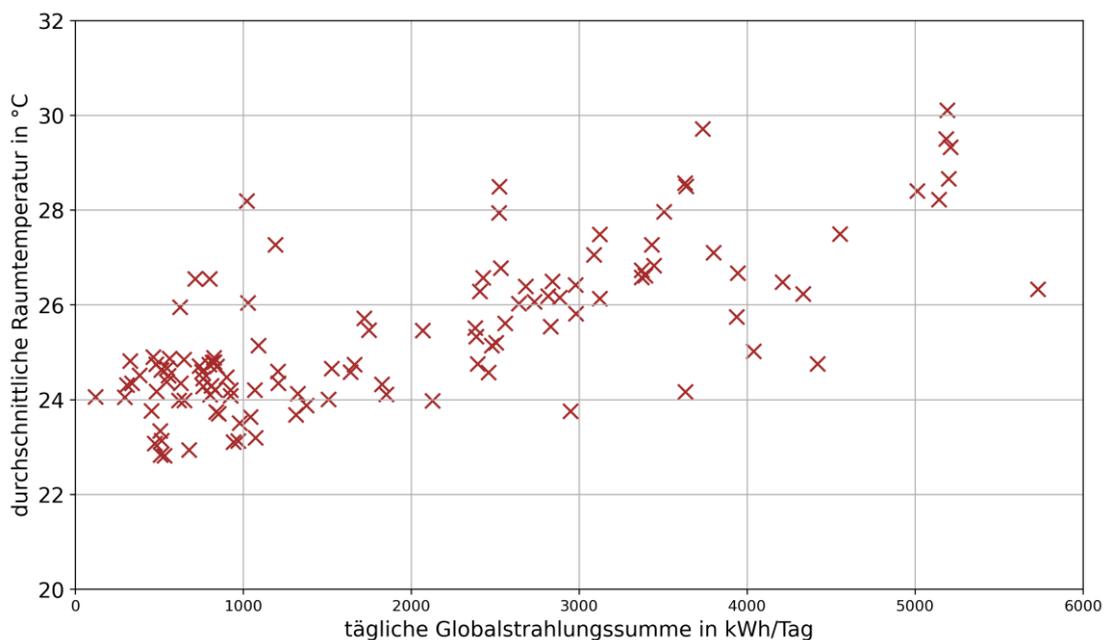


Abbildung 36: Streudiagramm der durchschnittlichen Raumtemperatur über der täglichen Globalstrahlungssumme von Januar bis April 2022

In der GLT wird für die Jalousiensteuerung ein fester Strahlungswert festgelegt ab dem die Jalousien automatisch heruntergefahren werden. Der dafür verwendete Strahlungswert wird von einem nach Westen ausgerichteten Sensor, da im RIZ nur an der Westfassade Jalousien vorhanden sind. Dabei wird zwischen zwei Werten für die Anwesenheits- und Abwesenheitszeiten differenziert. Die dafür festgelegten Schwellenwerte lauten wie folgt:

204.0	W/m ²	Einschaltwert Strahlungsstärke bei Abwesenheit
304.0	W/m ²	Einschaltwert Strahlungsstärke bei Anwesenheit

In Abbildung 37 wird die Position des Sonnenschutzes über der Globalstrahlung an der Westfassade im April 2022 in einem Streudiagramm aufgetragen. Dabei ist zu erkennen, dass in dem Zeitraum kein geregelttes Einschalten des Sonnenschutzes stattgefunden hat. Das ist dadurch zu erklären, dass der Übergangsbetrieb, der den Sonnenschutz erst aktiviert, manuell eingeschaltet wird und zu diesem Zeitpunkt das Gebäude sich folglich noch im reinen Heizbetrieb befand.

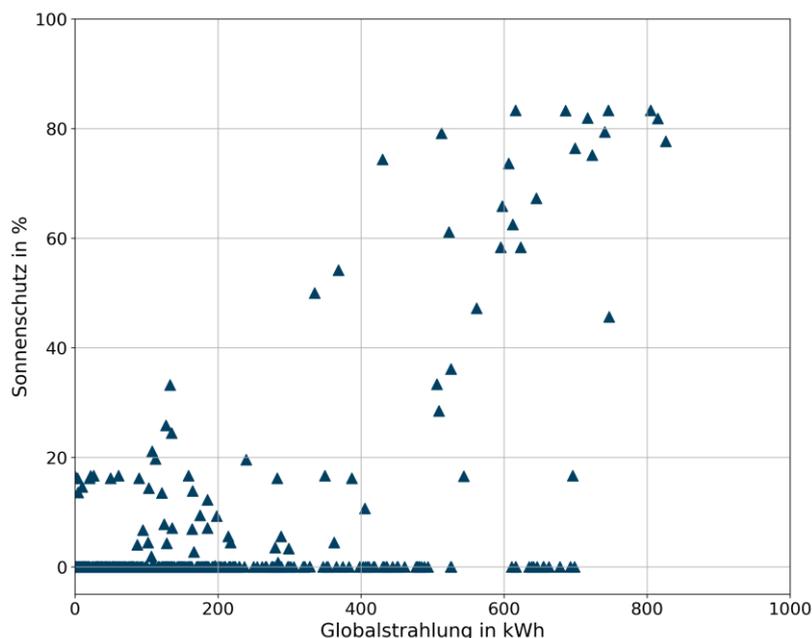


Abbildung 37: Position des Sonnenschutzes (0 % entspricht vollständig geöffnete und 100 % vollständig geschlossene Jalousien) über der Globalstrahlung an der Westfassade im April 2022

Zum Vergleich wird in Abbildung 38 dasselbe Streudiagramm für den August 2022, also im Kühlbetrieb, dargestellt. Hier ist deutlich zu erkennen, dass bei Übersteigen des Schwellenwerts die Jalousien geschlossen werden, wie das beim aktivierten Sonnenschutz zu erwarten ist. Es gibt nur wenige Datenpunkte, bei denen ersichtlich ist, dass die Jalousien auch bei knapp über 204 W/m² vollständig geöffnet waren. Das ist einerseits durch den höheren Schwellenwert in den Abwesenheitszeiten und andererseits durch die Tatsache zu erklären, dass die Benutzer den Sonnenschutz selbstständig steuern können.

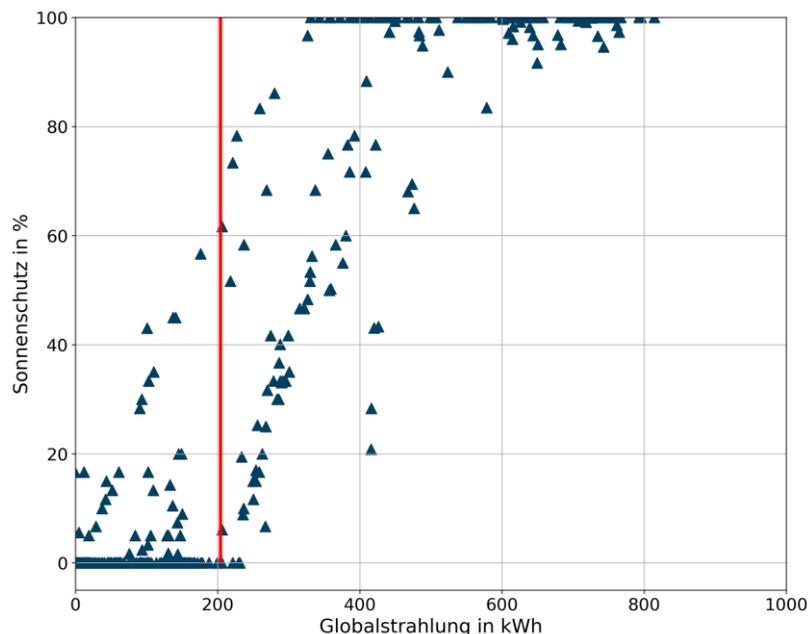


Abbildung 38: Position des Sonnenschutzes (0 % entspricht vollständig geöffneten und 100 % vollständig geschlossenen Jalousien) über der Globalstrahlung an der Westfassade im August 2022 und Schwellenwert für die Jalousiensteuerung in Anwesenheitszeiten (in rot)

Somit steht der mangelnde Sonnenschutz in der Übergangszeit 2022 als wesentliche Ursache für die erhöhten Raumtemperaturen fest. Dies führte zur kontinuierlichen Erwärmung der Innenräume, bis hin zu einem Punkt in dem die Wärme aufgrund der erheblichen Speichermasse des Gebäudes nicht mehr ausreichend entweichen konnte.

Der mangelnde Sonnenschutz kann darauf zurückgeführt werden, dass das Gebäude sich im betrachteten Zeitraum noch im Heizbetrieb also nicht im Übergangsbetrieb befand. Somit wurde konstant geheizt, ohne dass die erheblichen solaren Gewinne, die bereits im Frühjahr auftreten, von dem automatisierten Sonnenschutz abgefangen werden konnten. Das Umschalten von Heizbetrieb in den Übergangsbetrieb im richtigen Moment ist in der Gebäudetechnik keine unbekanntes Thematik. Diese Fehleranalyse ist ein eindeutiges Beispiel dafür, warum das frühzeitige Umschalten für den Gebäudebetrieb wichtig ist.

Die Handlungsempfehlung lautet in diesem Fall nach der nächsten Heizperiode rechtzeitig in den Übergangsbetrieb umzuschalten. Dabei können Wettervorhersagen und Messdaten genutzt werden, um die Globalstrahlung und somit die potentiellen solaren Wärmegewinne zu überwachen.

Weitere Details zu der manuellen Fehlererkennung der thermoaktiven Bauteile sind im technischen Bericht [9] zu finden.

3.2.2 Regelbasierte Fehlererkennung

Die regelbasierten Methoden kommen dabei häufig bei einzelnen Komponenten oder Subsystemen (z.B. Lüftungssystem) zum Einsatz, bei denen sich eine überschaubare Anzahl von Regeln (bzw. Fehlern) auf Grundlage eines festen Satzes an Messdaten definieren lässt [8].

Auf der mondas Plattform wurden weiterhin Daten bereitgestellt und Analysen durchgeführt, um den Gebäudebetrieb noch detaillierter zu Überwachen und Optimierungsbedarfe aufzudecken. Darüber hinaus wurden Module zur regelbasierten automatischen Fehlererkennung implementiert, die in Echtzeit mithilfe der Messdaten vordefinierte Fehler im Gebäude identifizieren und kennzeichnen können.

Als Beispiel wird hier eine der im RIZ Energie durchgeführten regelbasierten Fehlererkennung beschrieben. Dazu wurden die typischen Fehler nach AMEV Richtlinie (TMon) für Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung und Luftherhitzer zurate gezogen. In den ersten Schritten des Arbeitspakets wurde beim Auslesen der Daten aus der GLT berücksichtigt, dass alle nach AMEV TMon erforderlichen Datenpunkte (siehe Abbildung 39) in der Monitoringplattform zur Verfügung stehen. Somit ist es zum jetzigen Projektstand möglich alle in der AMEV Richtlinie festgelegte Fehler (sofern ein entsprechender Messpunkt am RIZ vorhanden ist) automatisiert zu erkennen.

Datenpunkte									
Nr.	Bezeichnung lang	Datenpunktbezeichnung (DP)	POS	SYS	SUBSYS1	SUBSYS2	MED	Unit	
0	Außentemperatur	MEA.T		AHU	ODC		AIR.OD	°C	
1.1/2.1	Ventilatorleistung	MEA.POW.EL	SUP/RET	AHU		FAN	AIR.SUP/ EXTR	kW	
1.2/2.2	Zuluft-/Abluftkanaldruck	MEA.P.DIFF	SUP/RET	AHU		FAN	AIR.SUP/ EXTR	Pa	
1.3/2.3	Stellsignal Zuluft-/Abluftventilator	SEV.SPEED	SUP/RET	AHU		FAN	AIR.SUP/ EXTR	Pa	
3.1/5.1	Zuluft-/Ablufttemperatur	MEA.T	SUP/RET	AHU			AIR.SUP/ EXTR	°C	
3.2/5.2	Zuluft-/Abluftfeuchte	MEA.HUM	SUP/RET	AHU			AIR.SUP/ EXTR	%	
3.3/5.3	Volumenstrom Zuluft/Abluft	MEA.VF	SUP/RET	AHU			AIR.SUP/ EXTR	m³/h	
3.4	Sollwert Zulufttemperatur	SEV.T	SUP	AHU			AIR.SUP	°C	
4.1/10.1	Temperatur nach/vor WRG	MEA.T	AF.HX/BF.HX	AHU		HX	AIR.SUP/ EXTR	°C	
4.2/10.2	Relative Feuchte nach/vor WRG	MEA.HUM	AF.HX/BF.HX	AHU		HX	AIR.SUP/ EXTR	%	
11	Stellsignal WRG	SEV.MOD		AHU		HX	AIR	%	
12	Stellsignal Luftherhitzer Pumpe	SEV.MOD	SUP	AHU	WC.H	PU	W.H	%	
15	Stellsignal Luftherhitzer Ventil	SEV.POS	SUP	AHU	WC.H	VAL	W.H	%	
17	Stellsignal Luftkühlerpumpe	SEV.MOD	SUP	AHU	WC.C	PU	W.CO	%	
20	Stellsignal Luftkühler Ventil	SEV.POS	RET	AHU	WC.C	VAL	W.CO	%	

Abbildung 39 Datenpunkte zur Fehlererkennung in Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung und Luftherhitzer nach AMEV Richtlinie Tmon.

Die mondas Plattform bietet in dem Regeleditor für virtuelle Sensoren (virtuelle Berechnungen aus echten Sensordaten als eigenständiger Sensor) die Möglichkeit vordefinierte Regeln zur Fehlererkennung zu importieren (siehe Abbildung 40). Darüber hinaus ist es auch möglich im Regeleditor eigene neue Regeln zu definieren, die im Anschluss ebenfalls zur Fehlererkennung verwendet werden können.

– AHU

01 - Kein Absenkbetrieb

02 - Heat recovery rate (HRC)

03 - Sollwert Zulufttemperatur nicht erreicht

04 - Heizregister läuft außerhalb Heizperiode

05 - Unnötiger Heizbetrieb

06 - Kühlregister läuft außerhalb Kühlperiode

07 - Unnötiger Kühlbetrieb

08 - WRG wird nicht eingesetzt

09 - Effizienz WRG unterschritten

10 - Effizienz Ventilator

11 - Sollwert Volumenstrom Zuluft nicht erreicht

12 - Sollwert Volumenstrom Abluft nicht erreicht

13 - Lüfter laufen Asynchron

14 - Heizregister versagt

15 - Kühlung versagt

Abbildung 40 Liste der vordefinierten Regeln in der mondas Plattform

Anhand der Implementierung der Regel AHU03 „Sollwert Zulufttemperatur nicht erreicht“ wird im Folgenden der Prozess der regelbasierten Fehlererkennung in mondas veranschaulicht.

Im ersten Schritt wird die Regel vordefiniert. In diesem Fall muss die Zulufttemperatur mit dem entsprechenden Sollwert der Zulufttemperatur abgeglichen werden. Ein Fehler wird nur dann erkannt, wenn die Differenz der beiden Temperaturen einen definierten Grenzwert länger als eine definierte Latenzzeit überschreitet. Der Regelknoten hat somit vier mögliche Eingangsparameter: Die Abtastrate, den Grenzwert, die Latenzzeit und das Minimum an prozentualer Abweichung. Abbildung 41 zeigt die Umsetzung dieser Regel im Regeleditor der mondas Plattform.

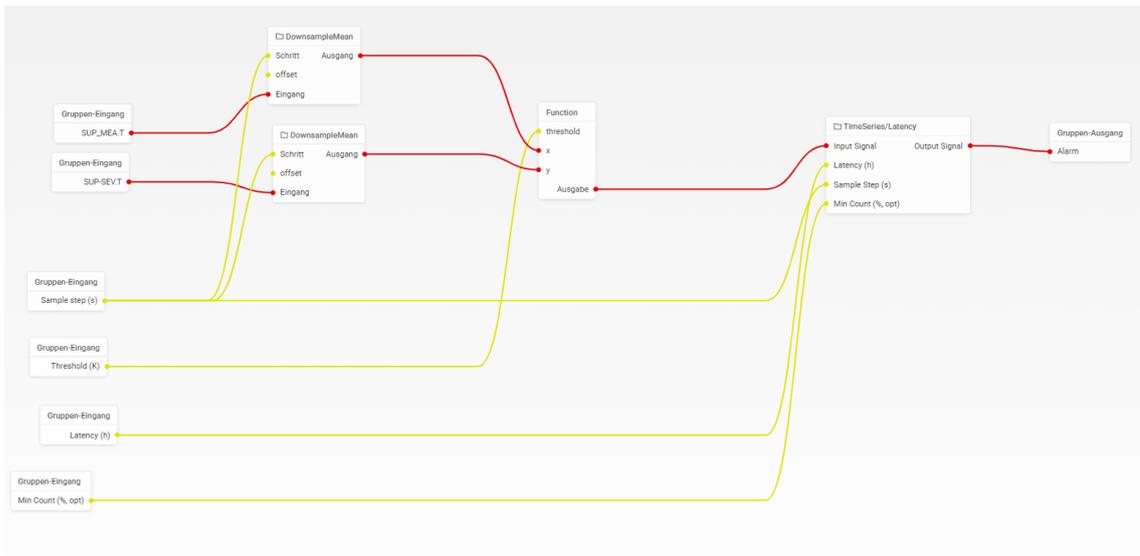


Abbildung 41 Regel AHU03 in mondas Regeleditor

Zusätzlich zu der Regel selbst werden auch mögliche Fehlerursachen, Handlungsempfehlungen und eventuelle Auswirkungsbereiche hinterlegt (siehe Abbildung 42).

Group: AHU/03 - Sollwert Zulufttemperatur nicht erreicht

AHU/03 - Sollwert Zulufttemperatur nicht erreicht

Fehler: Sollwert der Zuluft Temperatur wird nicht erreicht.

Grund: Gründe können vielfältig sein.

Handlungsempfehlung: Überprüfen der Anlage. Besonders Heiz- und Kühlregister, sowie WRG.

Auswirkungen: Behaglichkeit, Energie/Kosten

Syntax: $\text{abs}(\text{SUP-SEV.T-SUP-MEA.T}) > \{\text{tolerance}\}$

+ Local group

Abbildung 42 Zusätzliche Informationen zu dem Regelknoten AHU/03

Die oben vordefinierte Regel kann nun als Regelknoten in eine übergeordnete Regel eingesetzt werden, um die Logikabfrage mit den Messzeitreihen zu verknüpfen. Dazu werden für die Regel AHU03 gemäß AMEV Richtlinie (TMon) die zwei Messgrößen Sollwert der Zulufttemperatur und Istwert der Zulufttemperatur benötigt. Diese werden im Regeleditor mithilfe der BIM kompatiblen Metadatenstrukturen selektiert. Bei dem Istwert der Zulufttemperatur muss das Zeitprogramm der Lüftungseinheit in einem zuvor erstellten virtuellen Sensor berücksichtigt werden, da die Temperaturen außerhalb des Betriebs der Anlage für die Fehlererkennung unzulässig sind. Die Messzeitreihen müssen nun lediglich mit dem Regelknoten verbunden und passende Eingangsparameter gewählt werden (siehe Abbildung 43).



Abbildung 43 Fehlererkennung im mondas Regeleditor

Als Ausgangsgröße der oben erstellten Regel, wird dann ein binärer Wert erstellt, der entweder einen Normalbetrieb (0) oder einen Fehlerbetrieb (1) signalisiert.

In der mondas Monitoringplattform werden nun spezielle Widgets genutzt, um dem Anwender ein interaktives Dialogfeld anzubieten, auf dem Fehler im Betrieb gemeldet und angezeigt werden. Hierzu wird zunächst ein Ereignisprotokoll eingerichtet, der alle spezifische Fehlertypen für einen bestimmten Zeitbereich protokolliert und anzeigt.

Ein weiteres Widget dient zur Darstellung der Fehlerzustände in den Messzeitreihen. Mit diesem Visualisierungs-Widget kann der Anwender einen Einblick in den genauen Zeitpunkt des Fehlerbetriebs erhalten und die Messdaten selbst prüfen.

Abbildung 44 zeigt ein Ereignisprotokoll für den Fehlertyp „Sollwert Zulufttemperatur nicht erreicht“. Durch klicken des Uhrensymbols kann das Zeitfenster in dem Zeitreihendiagramm (siehe Abbildung 45) auf den Zeitpunkt des gewählten Fehlerbetriebs gesetzt werden. Somit kann der Anwender einen Blick auf die Zeitreihen von relevanten Messdaten werfen. In diesem Fall handelt es sich dabei um die Zeitreihen der gemessenen Zulufttemperatur (rosa Linie) sowie dem Sollwert der Zulufttemperatur (lila Linie). Darüber hinaus wird die binäre Zeitreihe des Fehlerzustands angezeigt (schwarze Linie), um den genauen Zeitpunkt anzuzeigen, an dem das System den Betrieb als Fehler erkennt.

Ereignisprotokoll

Sollwert Zulufttemperatur nicht erreicht (9 Ereignisse) Alarm

Timestamp	W...	Titel	Beschreibung	Status
9. Aug. 2022, 09:12:00	1	Alarm	Betrieb außerhalb...	Fehler
8. Aug. 2022, 09:28:00	1	Alarm	Betrieb außerhalb...	Fehler
2. Aug. 2022, 09:48:00	1	Alarm	Betrieb außerhalb...	Fehler
1. Aug. 2022, 09:12:00	1	Alarm	Betrieb außerhalb...	Fehler
29. Juli 2022, 09:48:00	1	Alarm	Betrieb außerhalb...	Fehler
28. Juli 2022, 09:16:00	1	Alarm	Betrieb außerhalb...	Fehler
27. Juli 2022, 10:36:00	1	Alarm	Betrieb außerhalb...	Fehler
18. Juli 2022, 09:00:00	1	Alarm	Betrieb außerhalb...	Fehler
11. Juli 2022, 09:28:00	1	Alarm	Betrieb außerhalb...	Fehler

1 Monat bis jetzt

Abbildung 44 Ereignisprotokoll für den Fehlertyp "Sollwert Zulufttemperatur nicht erreicht"

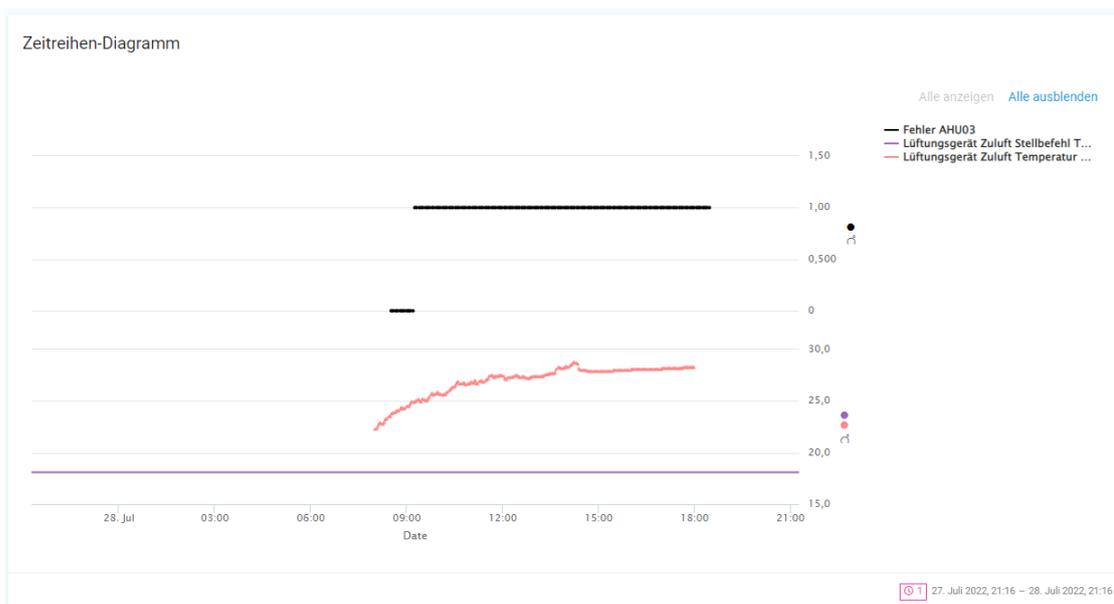


Abbildung 45 Zeitreihendiagramm für Messdaten zum Fehlertyp "Sollwert Zulufttemperatur nicht erreicht"

3.2.3 Modellbasierte Fehlererkennung

Bei der modellbasierten Fehlererkennung wird ein Modell einer Anlage oder eines ihrer Komponenten bzw. Teilsysteme erstellt und zur Fehlererkennung hinzugezogen. Das dynamische Anlagenverhalten und das Zusammenspiel verschiedener Komponenten ist bei geeigneten Modellen überprüfbar. Das Modell soll die wichtigsten Dynamiken des (Teil-) Systems oder der Komponente in einer Genauigkeit wiedergeben, die Fehler erkennbar werden lässt [10].

Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung (WRG) sind heute Stand der Technik. Sie nutzen die Abwärme/Kühle der verbrauchten Luft (Abluft), um frische Luft (Zuluft) im Winter aufzuwärmen und im Sommer zu kühlen. Mit ihnen lässt sich der Primärenergieverbrauch eines Gebäudes minimieren.

Die Streudiagramme (Signaturen) für Lüftungsanlagen zeigen die Tagesmittel der Systemtemperaturen auf der Luftseite (Zuluft, Abluft, Differenz zwischen Zu- und Abluft) und die Temperaturdifferenzen (Spreizung) auf der Wasserseite der Register über dem Tagesmittel der Außentemperatur. Daraus wird ersichtlich, ob die Heiz- oder Kühlregister in Betrieb sind und wann diese Wärmetauscher in Betrieb genommen werden. Die Lufttemperaturen werden mit der Betriebsrückmeldung bzw. dem Stellsignal der Ventilatoren gefiltert, so dass nur Temperaturen während des Betriebs der Anlage dargestellt werden. Entsprechendes gilt für die wasserseitigen Temperaturen in Bezug auf die betreffende Pumpe.

Es gibt eine Tabelle mit einem Überblick über den generellen Aufbau von Streudiagrammen für RLT-Anlagen, wie sie in Abschnitt 8.5.5 von [8] gezeigt wird. Dort sind die typischen Erscheinungsbilder der Streudiagramme in Abhängigkeit von den Funktionalitäten der Anlage dargestellt. Dies ist nützlich, weil, wie im Fall vom RIZ Energie, die Lüftungsanlage ein vom GLT-System getrenntes System mit autarker Regelung ist, so dass sie nicht so einfach zu überwachen oder zu steuern ist wie die anderen Komponenten der Gebäudetechnik.

Abbildung 47 zeigt einen Vergleich zwischen den Streudiagrammen einer Lüftungsanlage aus Neumann et al. [8] (Links) und der im RIZ Energie Gebäude installierten Lüftungsanlage (Rechts). Die Lüftungsanlage aus der Literatur ist mit einem Heiz- und einem Kühlregister (Heating and cooling coils/HC und CC) ausgestattet. Die Differenz zwischen Zu- und Ablufttemperatur ($dT_{\text{supa-exha}}$) zeigt, ob die versorgte Zone über die Zuluft beheizt oder gekühlt wird. Ist die Differenz positiv, wird die Zone beheizt, ist sie negativ, wird sie gekühlt. Die Spreizung auf der Wasserseite der Register ($CC\ dT_{\text{sup-ret}}$ und $HC\ dT_{\text{sup-ret}}$) zeigt, wann die Register zur Konditionierung der Zuluft eingesetzt werden. Während das Heizregister bei Außentemperaturen unter 15°C zum Einsatz kommt, wird das Kühlregister erst ab Außentemperaturen über 22°C eingesetzt [8].

Auf der anderen Seite zeigen die Streudiagramme der Lüftungsanlage im Fall des RIZ Energie ein anderes Verhalten. Beispielsweise zeigt das Streudiagramm der Zulufttemperatur ein typisches Bild (siehe Abbildung 46A) für eine Anlage, die lediglich über ein Heizregister verfügt. Dies bedeutet, dass die Zuluft im Winter erwärmt, im Sommer aber nicht gekühlt wird. Die Differenz zwischen Zuluft- und Außentemperatur ($dT_{\text{ZUL-AT}}$) zeigt ebenfalls ein typisches Verhalten, wenn nur die Luft beheizt wird (siehe Abbildung 46B). Hinsichtlich der Temperaturdifferenz zwischen Vor- und Rücklaufwassertemperatur im Heizregister ($HR\ dT_{\text{VL-RL}}$) zeigt sich das in Abbildung 46C) dargestellte Muster und dass das Heizregister bei Außentemperaturen unter 7°C zum Einsatz kommt. Im Falle des RIZ Energie ist die Differenz zwischen der Zuluft- und der Ablufttemperatur ($dT_{\text{ZUL-ABL}}$) kein Indikator dafür, dass die Zone durch die Zuluft aufgeheizt oder abgekühlt wird, da das Gebäude über ein unabhängiges Heiz- und Kühlsystem verfügt.

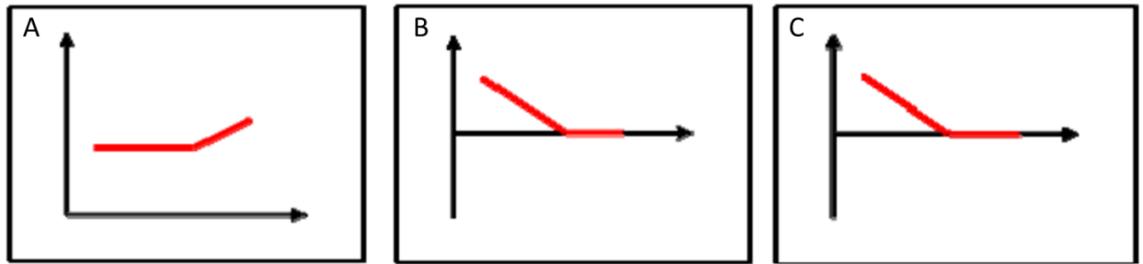


Abbildung 46 Typischen Erscheinungsbilder (vereinfacht). A) Zulufttemperatur über Außentemperatur (AT). B) Temperatur differenz Zuluft – AT über AT. C) Temperatur spreizung Wasserseite Heizregister über AT.

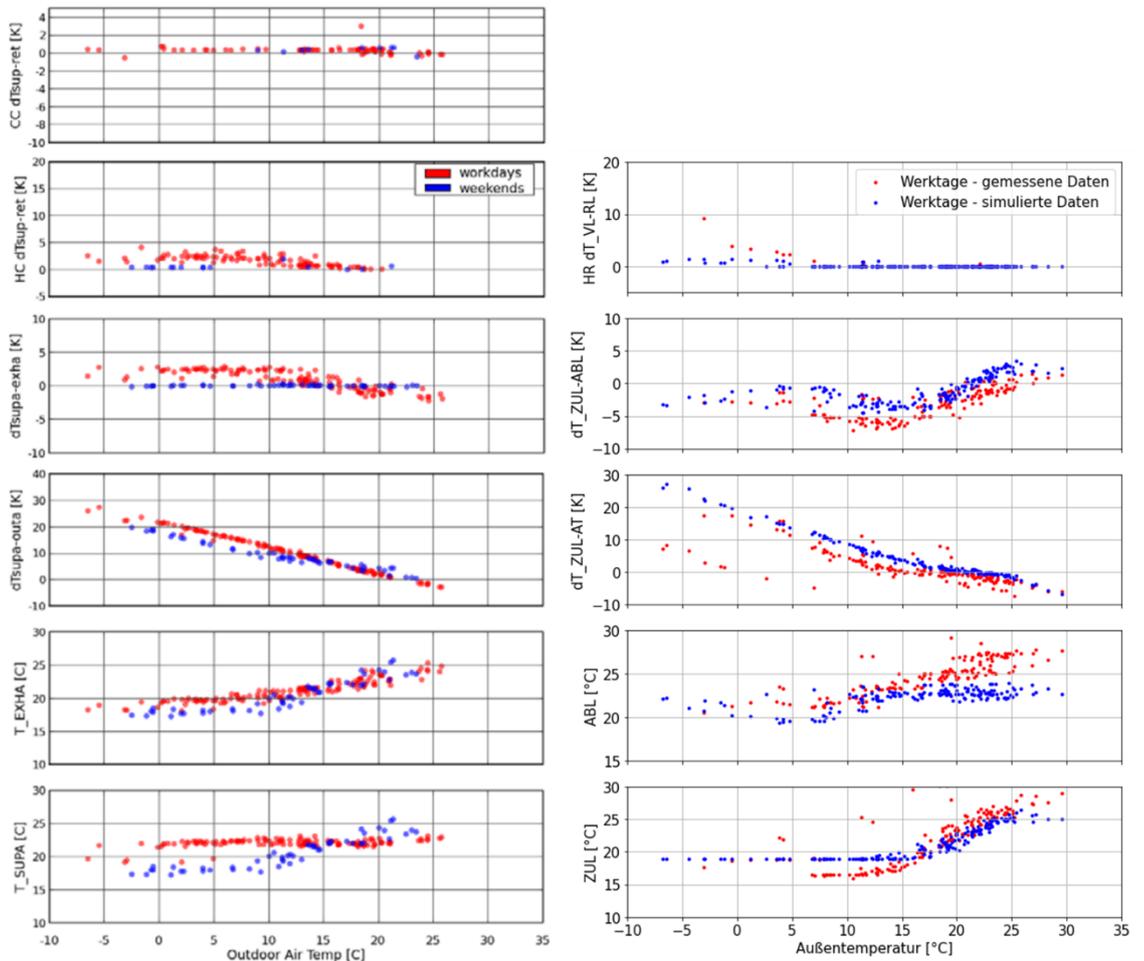


Abbildung 47 Links: Beispiel eines Scatterplots für Lüftungsanlagen mit Heiz- und Kühlregister von der Literatur [8]. Rechts: Scatterplot für die Lüftungsanlage des RIZ Energie nur mit Heizregister.

Abbildung 48 zeigt eine grafische Darstellung des Lüftungsgerätes des RIZ Energie und die wichtigsten Messgrößen:

- 1) Außenlufttemperatur bzw. Eintrittstemperatur
- 2) Ablufttemperatur
- 3) Lufttemperatur nach der Wärmerückgewinnung
- 4) Temperatur nach dem Heizregister bzw. Zulufttemperatur
- 5) Stellung der Bypass-Klappe
- 6) Druck in den Zu- und Abluftkanälen
- 7) Vor- und Rücklauftemperaturen am Heizregister

In der Abbildung 48 ist ebenfalls eine Klappe vor der Wärmerückgewinnungseinheit dargestellt. Hierbei handelt es sich nur um ein visuelles Hilfsmittel, das darstellen soll welcher Anteil des Luftstroms durch die Wärmerückgewinnungseinheit und welcher Anteil durch den Bypass strömt. Wenn die gewünschte Zulufttemperatur in der Lüftungsanlage nur mit Hilfe der Wärmerückgewinnung erreicht wird (in den Sommermonaten und in der Übergangsjahreszeit), arbeitet das Heizregister nicht. Wenn es nicht möglich ist, die gewünschte Zulufttemperatur zu erreichen (im Winter), wird das Heizregister mit Energie aus dem Wärmespeicher des Gebäudes betrieben, um die gewünschte Temperatur zu erreichen.

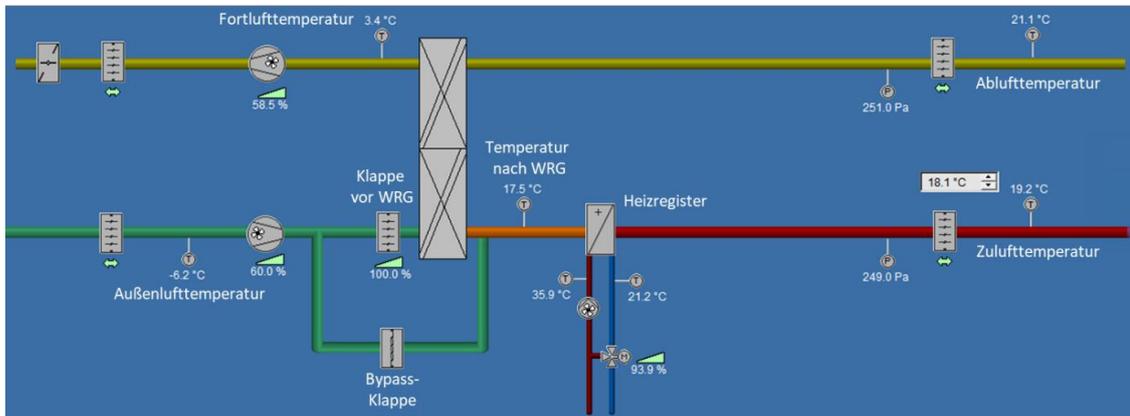


Abbildung 48 Schematische Darstellung der RIZ Energie Lüftungsanlage

Für die Fehlererkennung in der Lüftungsanlage wurde ein analytisch basiertes Verfahren verwendet, das die Differenz zwischen Messdaten der Anlage und einem mathematischen Modell in Form von Residuen zur Fehlererkennung nutzt. Sind die Residuen gleich Null, wird das System als fehlerfrei angesehen. Umgekehrt können diese Residuen groß sein, wenn Fehler auftreten, oder sie können klein sein, wenn die Residuen in Form von Rauschen, Störungen und/oder Modellierungsfehlern auftreten. Um häufige Fehlermeldungen zu vermeiden, wird ein geeigneter Schwellenwert (Threshold) aus diesen Formen von Residuen berechnet, um das Auftreten von Fehlern im System zu erkennen.

Zur Validierung dieses Simulationsmodells werden die gemessene Außen- und Ablufttemperatur im Modell verwendet. Abbildung 49 zeigt den Vergleich zwischen den gemessenen und simulierten Temperaturen nach der Wärmerückgewinnungseinheit sowie den anteiligen Luftvolumenstrom durch die Wärmerückgewinnungseinheit. Die Ergebnisse zeigen eine hohe Übereinstimmung zwischen den simulierten und den gemessenen Werten im Normalbetrieb bzw. bei fehlerfreier Funktion. Das Modell gilt damit als validiert.

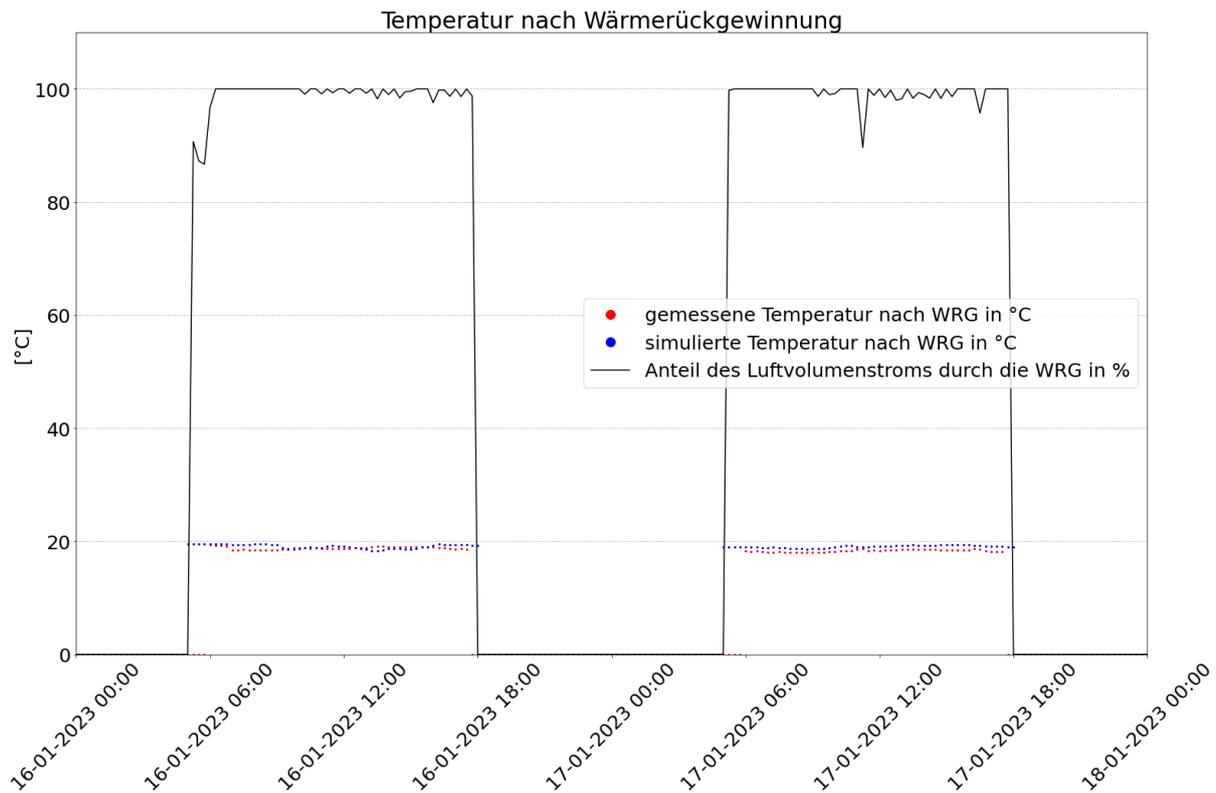


Abbildung 49 Exemplarischer Ausschnitt der Validierung des Lüftungsanlagenmodells. Vergleich der simulierten und gemessenen Temperaturen nach WRG

Für die Fehlererkennung wurde ein Threshold von 2 Kelvin [K] festgelegt. Das heißt, wenn die Differenz zwischen der simulierten und der gemessenen Temperatur nach der Wärmerückgewinnungseinheit größer als 2 K ist, erkennt der Algorithmus, dass ein ungewöhnlicher Zustand vorliegt, und überprüft, ob die Klappe vor der Wärmerückgewinnungseinheit wie erwartet funktioniert hat.

In Abbildung 50 sind als Beispiel einige Tage im September (ein Übergangsmonat, in dem das Heizregister noch nicht in Betrieb ist) dargestellt, an denen der Algorithmus fehlerhafte Zustände erkannt und markiert hat:

- Am 29.09.2022 und am 30.09.2022 (gelb markiert) wurde der Schwellenwert überschritten, was bedeutet, dass die gemessene Temperatur deutlich von der simulierten abweicht (hier: Überschreitung). In diesem Fall sollte sich die Klappe öffnen, um die Zuluft abzukühlen. Hier ist anhand der gemessenen Klappenposition zu erkennen, dass die Klappe nicht wie erwartet funktionierte: Sie war vollständig geschlossen.
- Am 26.09.2022 und 27.09.2022 (grün markiert) trat das Gegenteil ein. Der Schwellenwert wurde unterschritten, weil die gemessene Temperatur um mehr als 2 K niedriger war als die simulierte Temperatur. In diesem Fall sollte die Klappe weiter öffnen, damit die Zulufttemperatur nicht so sehr absinkt.
- Am 03.10.2022 wurde der Threshold nicht verletzt, da die Klappe wie erwartet funktioniert hat.

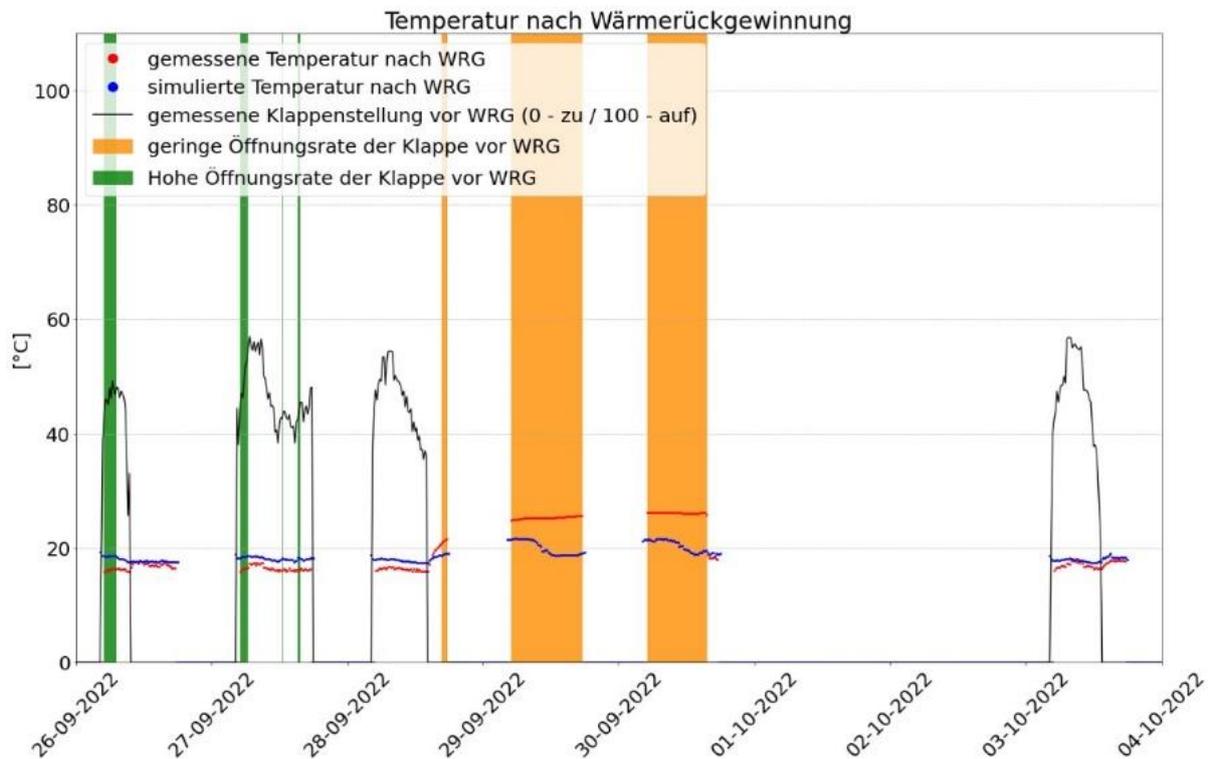


Abbildung 50 Fehlererkennung in der Lüftungsanlage, wenn nur die Wärmerückgewinnungsanlage in Betrieb ist. Kein Betrieb des Heizregisters.

Wenn die Wärmerückgewinnungseinheit und das Heizregister gleichzeitig in Betrieb sind, weil es nicht möglich ist, die gewünschte Zulufttemperatur nur mit Hilfe der WRG zu erreichen, dann könnte der Fehlerzustand auf einen Fehler in der Klappe, einen Fehler im Heizregister oder einen Fehler aufgrund einer Kombination beider Komponenten zurückzuführen sein. In diesem Fall gibt es auch einen vorgegebenen Schwellenwert von 2 K Differenz zwischen der gemessenen Zulufttemperatur und der Soll-Zulufttemperatur.

Abbildung 51 zeigt als Beispiel einen Zeitraum, in dem zwei Fehlerfälle erkannt und vom Algorithmus markiert wurden:

- Am 15.03.2022 (gelb markiert) war die gemessene Temperatur niedriger als die Solltemperatur, aber die Klappe war vollständig geöffnet. Offensichtlich gelingt es dem Heizregister nicht, die Zuluft auf die Solltemperatur zu erwärmen.
- Demgegenüber ist am 11.03.2022 und 14.03.2022 (grün markiert) zu erkennen, dass die gemessene Zulufttemperatur höher war als die Solltemperatur, obwohl das Heizregister in Betrieb war. Erstens war die Bypass-Klappe nicht vollständig geöffnet. Zweitens erwärmte das Heizregister die Zulufttemperatur über die Solltemperatur hinaus.

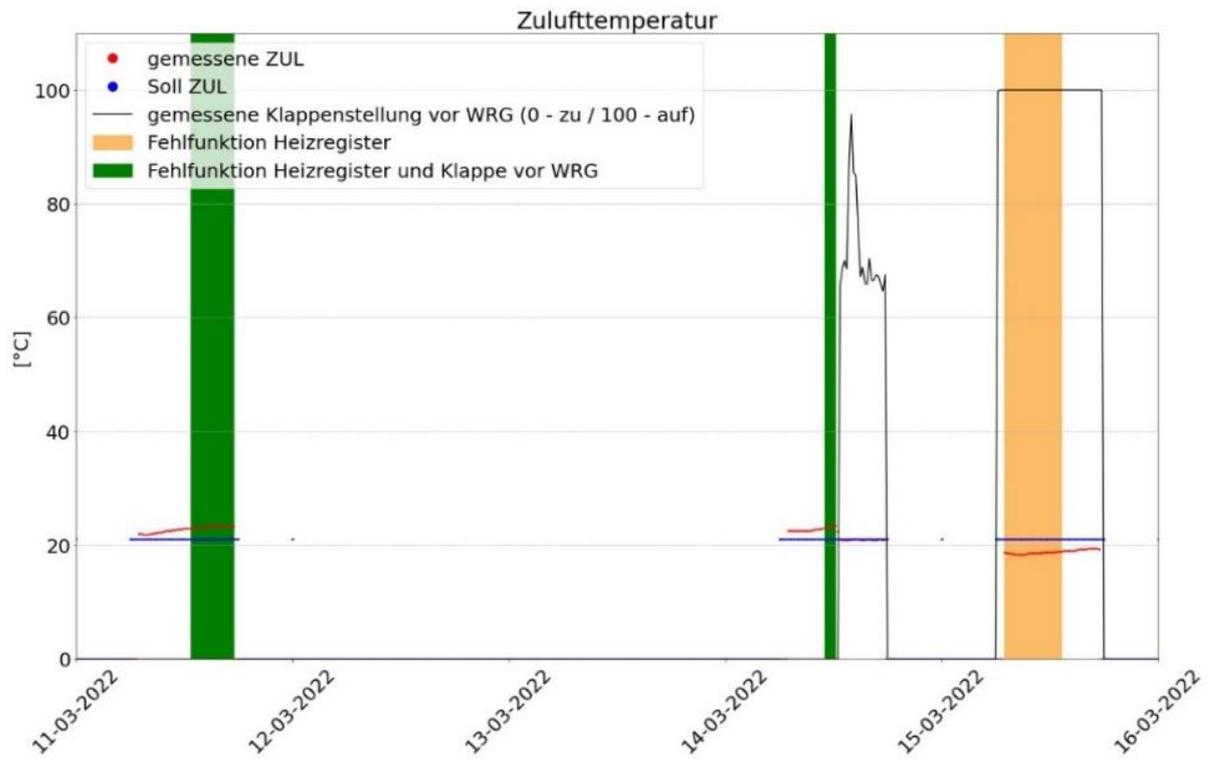


Abbildung 51 Fehlererkennung in der Lüftungsanlage, wenn sowohl das Wärmerückgewinnungssystem als auch das Heizregister in Betrieb sind.

Weitere Informationen zu der modellbasierten Fehlererkennung sind im entsprechenden technischen Bericht [11] zu finden.

4 AP2: Strukturdaten, Gebäudeleittechnik (GLT) und Monitoringkonzept (Mondas GmbH)

Die Datenerfassungsstruktur basiert auf der Nutzung, der durch die Mess- und Datenpunkte gegebenen Infrastruktur der Gebäudeautomation. Ergänzt wird diese durch die Integration von zusätzlichen Messgrößen wie Temperaturen, Durchflüsse oder Volumenströme, Wärme- und Stromzähler mit Netzanbindung über Modbus, M-Bus (Meterbus), KNX, XWP oder BACnet.

4.1 Messkonzept des RIZ Energie

Die Gebäudeleittechnik wurde von der Siemens AG konzipiert und umgesetzt und umfasst zwei Systeme: Die Zentralen Gebäudesysteme und die Einzelraumregler. Alle in der GLT befindlichen Daten belaufen sich auf insgesamt ca. 11.000 Datenpunkte, die von 7 Controller verarbeitet werden und über BACnet mit dem GLT-Server kommunizieren. Zusätzlich greift ein Gateway der Firma mondas über die jeweiligen BACnet-Adressen auf ausgewählte Datenpunkte der GLT zu, um diese extern in einer browserbasierten Monitoringplattform darzustellen.

Diese Maßnahme ermöglicht es den Gebäudebetrieb zu überwachen und einen Einblick in die Betriebszustände der einzelnen Gewerke zu erhalten. Die GLT vereint im RIZ Energie Feldgeräte wie Umwälzpumpen, Stellventile und Lüftungsklappen, sowie die Grundwasserbrunnen, Wärmepumpe oder Lüftungsanlage. Die Daten dieser Geräte laufen auf sogenannten Informationsschwerpunkten (ISP) zusammen. Da es sich dabei um verschiedene Geräte unterschiedlicher Hersteller handelt, gibt es kein einheitliches Kommunikationsprotokoll mit dem die Messdaten abgerufen werden.

Auf die GLT laufen ebenfalls die Messdaten der Einzelraumregler auf, die die Raumtemperaturen, die Positionswerte der Jalousien und die Temperatursollwertverschiebungen der Büroräume beinhalten. Diese Einzelraumregler kommunizieren über KNX mit den RA-Stationen (Raumautomatisation).

Abbildung 52 zeigt eine Zusammenfassung der Systemtopologie der TGA am RIZ Energie. Hier ist ersichtlich, dass verschiedene Verbindungsarten zu Feldgeräten und Komponenten bestehen, die schlussendlich einheitlich auf dem GLT-Server gebündelt sind und dort von der Monitoringplattform ausgelesen werden können. Die mondas Monitoringplattform steht in ständiger Kommunikation mit dem GLT-Server und ermöglicht dabei nicht nur das Auslesen und Darstellen, sondern auch das Schreiben von Datenpunkten. Zusätzlich liest die mondas-Plattform Daten aus einem SEL-Datenlogger (Smart Energy Log) aus. Hier befinden sich alle Wärmemengen- und Elektrozählerdaten. Diese Daten werden nicht in der GLT aufgenommen, da sie für den Gebäudebetrieb nicht relevant sind.

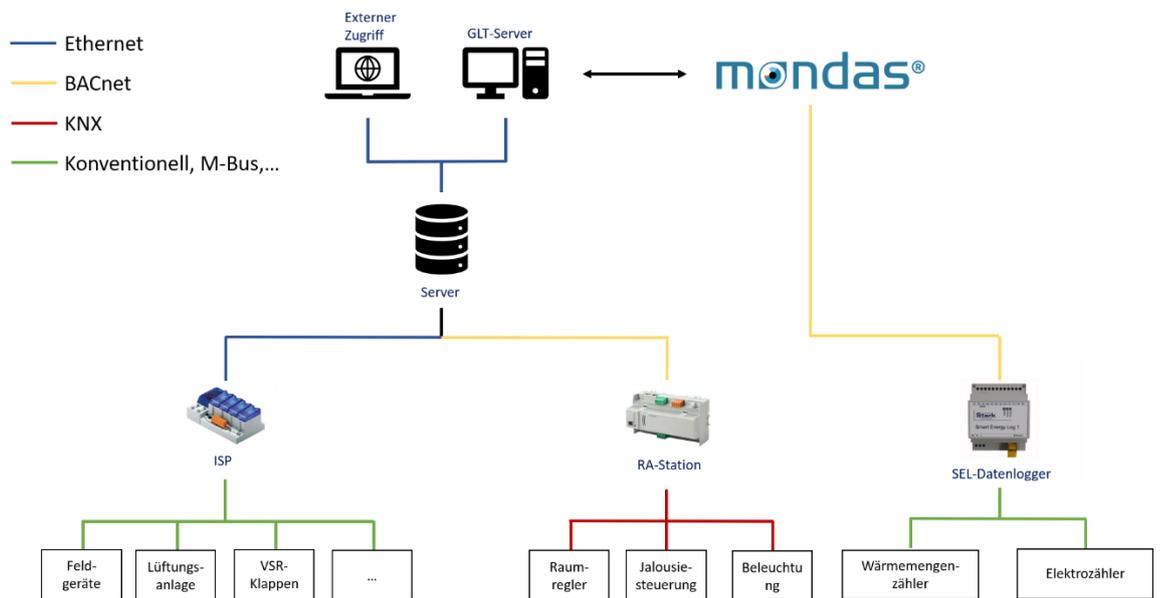


Abbildung 52 Systemtopologie der Gebäudeleittechnik und des Monitoringsystems am RIZ Energie

Von den 11.000 Datenpunkten werden insgesamt etwa 1.000 erfasst. Das Energie- und Raumklimamonitoring wird vor dem Hintergrund langjähriger Erfahrung im Lang- und Kurzzeitmonitoring auf die notwendigen Energiezähler bzw. die erforderliche Komfortmesstechnik reduziert:

- Nutzung einer vorhandenen Wetterstation der Hochschule Offenburg (Außentemperatur, Globalstrahlung, Diffuse Strahlung, relative Feuchte, Windgeschwindigkeit usw.)
- 12 x Raumtemperatur, 5 x Raumlufffeuchte und 5 x CO₂-Gehalt
- neuartige VOC- und Feinpartikelmesstechnik der Fa. Testo
- 27 x Stromzähler
- 2 x Kältezähler
- 4 x Wärmezähler
- 3 x kombinierte Wärme/Kältezähler
- Datenpunkte der Hauptkomponenten, insb. Brunnen, Wärmepumpe und Lüftungsanlage sowie Flächentemperierung (inkl. 16 x Rücklauftemperatur)
- Datenpunkte der „großen“ Laboreinrichtungen.

Mit der Gebäudeleittechnik ist es möglich, über die eindeutigen Adressen auf die Datenpunkte und Zählerwerte der Siemens-Gebäudeautomation zuzugreifen, da diese als BACnet-Objekte vorliegen. Die Objekte können dann sowohl gelesen als auch geschrieben werden. Ausgewählte BACnet-Objekte werden gemäß individuell anpassbaren Kriterien in eine herstellernerneutrale Datenbank außerhalb der Siemens-Gebäudeautomation übertragen und dort gespeichert. Diese Daten stehen für das Monitoring und für weitere Auswertungen zur Verfügung.

4.2 Monitoringplattform: mondas IoT

Das technische Monitoring bringt beim digitalen Inbetriebnahmeprozess viele Vorteile mit sich. Die technische Umsetzung des Anlagen-, Energie und Komfortmonitorings wurde mit der Weboberfläche **mondas IoT** realisiert. Die Plattform ist auf das Zeitreihenmanagement spezialisiert und wird genutzt, um Messdaten zu bearbeiten, zu modifizieren und zu visualisieren.

Die bereitgestellte Weboberfläche wird im Projektverlauf für die digitale Inbetriebnahme verwendet. Die Metadatenstruktur, die von Fraunhofer ISE entwickelt wurde, ist innerhalb der Weboberfläche für die Messdatenerfassung am RIZ Energie implementiert.

Die Weboberfläche greift über ein lokal installiertes Gateway auf die am *RIZ Energie* erfassten Daten zu und ermöglicht dann eine Weiterverarbeitung und Visualisierung der Daten. Dazu können unter anderem Carpetplots („Teppichdiagramme“), Streudiagramme („x,y-Darstellungen“) und Zeitreihendiagramme (vgl. Abbildung 53) erstellt werden.



Abbildung 53 Beispiel für Zeitreihendiagramme für den Saug- und Schluckbrunnen: Pumpenbetrieb sowie Vor- und Rücklauftemperatur.

Über die einfache Visualisierung hinaus bietet die Weboberfläche ebenfalls die Möglichkeit, „virtuelle Sensoren“ zu erstellen. Diese Funktion ist speziell für zeitreihenbasierte Anwendungen konzipiert und ermöglicht es (ggf. auch rückwirkend mit historischen Daten) Zeitreihen zu verändern oder zu modifizieren. Das Prinzip kann am Beispiel einer Differenzenbildung anschaulich erläutert werden: Mit einem virtuellen Sensor ist es möglich, aus zwei Zeitreihen für die Vor- und Rücklauftemperatur eines Systems einen (virtuellen) Sensor für die Temperaturdifferenz zu erstellen, vgl. Abbildung 54.



Abbildung 54 Programmierung eines virtuellen Sensors zur Berechnung von Temperaturdifferenzen.

Zeitreihen und Diagramme werden getrennt für die einzelnen Anlagen dargestellt, um Subsysteme und Anlagenkomponenten getrennt und unter Berücksichtigung ihrer Wechselwirkung evaluieren und optimieren zu können:

- Wetterstation
- Brunnenanlage
- Wärmepumpe
- Wärmespeicher
- Betonkerntemperierung
- Lüftung
- Arbeitsplatzqualität

Damit können Teilenergiekennwerte und das Innenraumklima (jeweils in Abhängigkeit des Wetters, der Anwesenheit und des Nutzerverhaltens) bestimmt bzw. analysiert werden.

4.3 Metadatenstruktur

Zur Datenstrukturierung wurde vom *Fraunhofer ISE* ein Metadatenkonzept entwickelt und mit den entsprechenden Metadaten für das *RIZ Energie* parametrisiert. Tabelle 1 zeigt die Hauptkategorien des Konzepts.

Tabelle 1 Metadatenkonzept für das RIZ Energie.

Kategorie	Beschreibung	Beispiel
Zone	räumliche Zone, in der sich der Sensor befindet / auf die sich der Sensor bezieht	EG, 1. OG, Technikum
SYS	technisches System, in dem sich der Sensor befindet	AHU (Lüftungsanlage), GWW (Grundwasserbrunnen)
SUBSYS	Untersystem innerhalb eines technischen Systems	HX (Wärmetauscher), HP (Wärmepumpe)
MED	Medium, das gemessen wird	HW (Heizwasser), AIR.OD (Außenluft)
POS	Position des Sensors innerhalb des technischen Systems, z.B. Vor- oder Rücklauf	SUP (Vorlauf), RET (Rücklauf), TOP (oben)
DP	Typbezeichnung des Datenpunkts	MEA.T (gemessene Temperatur), COM.CLEA (Schaltbefehl Freigabe)

Die Metadaten werden innerhalb der Webplattform genutzt, um strukturiert Abfragen durchführen zu können. So kann beispielsweise im technischen System Wärmepumpe über die Kategorien SYS und DP eine Abfrage aller Temperaturmessungen realisiert werden. Dafür wird für die Kategorie SYS die Auswahl GEN.H (Wärmeerzeugung) und für die Kategorie DP die Auswahl MEA.T (gemessene Temperaturen) getroffen.

Abbildung 55 zeigt einen Ausschnitt der in mondas IoT hinterlegten Metadaten-tabelle.

ImportLabel	Description	Unit	object-type	SYS	SUBSYS1	SUBSYS2	MED	POS	DP	Color	Min
Heiz-/Kältekreis zur...	RIZETHC'FIRHC14'VlvShof1	Ventil Zone 1.4.2	Binärer Ausgang	WC.HC.ACS		VAL_CTRL	W.HC	RET	COM.CLEA	■	
Lüftungsgerät Klapp...	RIZET'AAhu'Dmp2	Fortluft/Abluftklappe	Binärer Eingang	AHU	DAMP		AIR_EXTR		STAT.POS	■	
Heiz-/Kältekreis zur...	RIZETHC'FIRHC33'HCdmd	Wärme/Kältebedarf	Binärer Wert	WC.HC.ACS			W.HC		COM.CLEA	■	
Lüftungsgerät Abluf...	RIZET'AAhu'Exp	Abluftdruck	Analoger Eingang	AHU				AIR_EXTR	MEA.P	■	
Heiz-/Kältekreis zur...	RIZETHC'FIRHC31'PrOpMod	Aktuelle Betriebsart	Binärer Wert	WC.HC.ACS			W.HC		STAT.MOD	■	
Brunnen Pumpe 2 K...	RIZET'WPu2'Mdl1	Stetige Ansteuerung	Analoger Ausgang	GWW	PU		W.CO	SUP	SEV.POS	■	
Lüftungsgerät Volu...	RIZET'AFI'3'VSR6	VSR 3.1.Z.1.3.OG 3.16 ZUL	Analoger Ausgang	AHU				AIR_SUP	SEV.VF	■	
Heiz-/Kältekreis zur...	RIZETHC'FIRHC21'VlvShof2	Ventil Zone 2.1.3	Binärer Ausgang	WC.HC.ACS		VAL_CTRL	W.HC	RET	COM.CLEA	■	
Heiz-/Kältekreis 3 P...	RIZETHC'HOGrp3'MxCrt'PU/Cmd	Befehl	Binärer Ausgang	WC.HC	PU		W.HC	SUP	COM.CLEA	■	
Außenklima MEA.S...	RIZET'AWthStrSolAzim	Sonnennazimut	Analoger Eingang	ODC					MEA.SUN.ANGL	■	

Abbildung 55 Ausschnitt aus der Metadaten-tabelle in der Webplattform mondas IoT.

5 AP3: Gebäudemonitoring und Datenanalyse (Hochschule Offenburg)

Das Monitoring ist komplett einsatzfähig und die Datenanalyse des Gebäudes ist ein ständiger und kontinuierlicher Prozess, der während des gesamten Projekts durchgeführt wurde und auch in Zukunft durchgeführt werden wird. Es existiert ein Dashboard zur Abfrage der Datenpunkte, die für die modellbasierte Datenauswertung als Eingangsdaten dienen. Darüber hinaus wurde ein Prozess entwickelt, wodurch diese Daten strukturiert abgefragt werden können. Es wurde eine Schnittstelle zwischen der mondas-Plattform und der Projektwebsite eingerichtet, über die alle Messdaten der Hauptsysteme des Gebäudes in Echtzeit unter folgendem Link angezeigt werden können (<https://build-digitized.hs-offenburg.de/monitoring>).

5.1 Datenflussbild des Projekts

Abbildung 56 zeigt den Datenfluss zwischen den Projektbeteiligten. Im Kern des Datenflussbilds liegen die Daten des BIM-Modells, auch statische Informationen genannt, und die Echtzeit-Messdaten des RIZ-Gebäudes, auch dynamische Informationen genannt. Die Hochschule Offenburg spielt dabei eine zentrale Rolle, da sie als Projektkoordinator und Gebäudebetreiber in alle Arbeitspakete als Moderator des Datenflusses eingebunden ist. Um die Qualität der Daten zu gewährleisten, war es notwendig, eine Verifizierung der BIM-Modelldaten gegen die tatsächliche Konstruktion vor Ort durchzuführen. Es wurde eine ETL-Pipeline (Extract, Transform, Load) implementiert, um die Daten aus der mondas-Plattform zu extrahieren und für die Verwendung z.B. für den digitalen Zwilling, für die Durchführung von Energieanalysen oder die manuelle Fehlererkennung der Gebäudesysteme vorzubereiten.

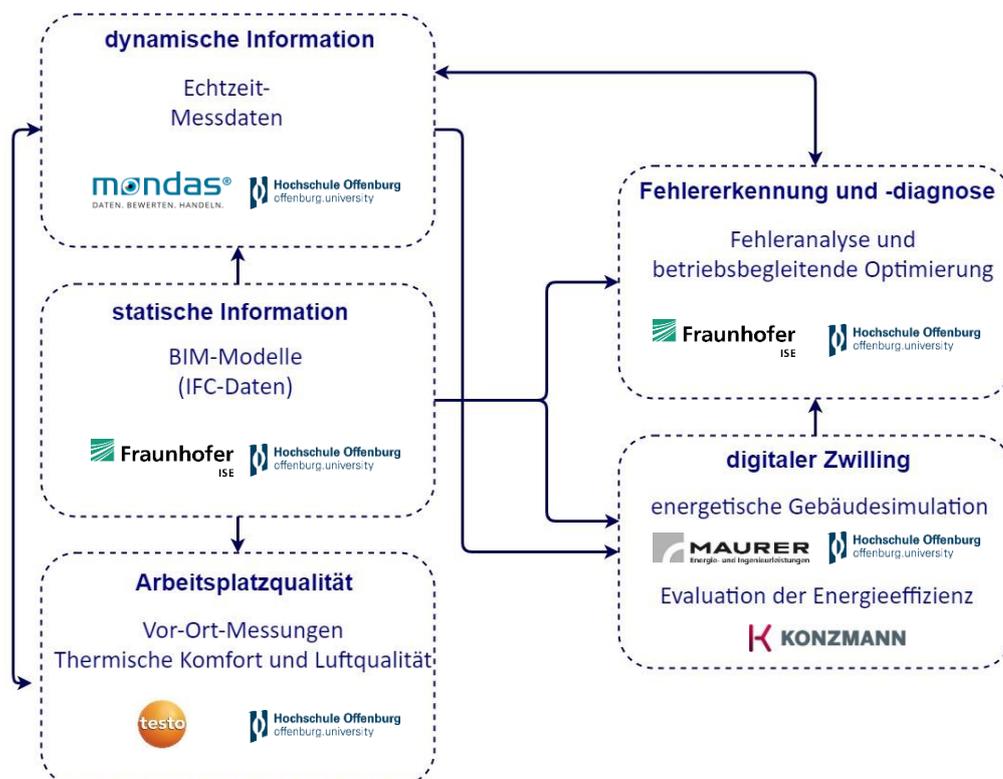


Abbildung 56 Datenflussbild des Projekts BUILD.DIGITIZED

5.2 Monitoring Aufbereitung

Die Validierung der Datenpunkte erfolgte in mehreren Schritten. Die erste Prüfung war eine rein visuelle Prüfung. Alle Datenpunkte wurden in einem Übersichts-Dashboard als Grafik dargestellt. Ebenfalls wurden der Minimal- bzw. Maximalwert, sowie der letzte gemessene Wert angezeigt. So konnten beim Sichten aller Datenpunkte eindeutige Fehlzuordnungen, sowie auch falsch zugeordnete Messeinheiten schnell erkannt werden. Da es sich dabei um über 1000 Datenpunkte handelte, war diese erste Prüfung sehr zeitaufwendig.

Ein nächster Schritt war die Plausibilitätsprüfung der Messdaten. Hierfür wurden strukturierte Abfragen erstellt, durch die typische Fehlzuordnungen der Datenpunkte festgestellt werden konnten. Beispielsweise konnten so bei der Gegenüberstellung von Vor- und Rücklauftemperaturen erkannt werden, ob die beiden Datenpunkte vertauscht wurden. Ähnliches ist in Abbildung 57 zu sehen, wo die Zu- und Ablufttemperaturen der Lüftungsanlage gegenübergestellt werden.

Ein häufiger Grund für unplausible Messdaten waren falsch zugeordnete Metadaten. Beispielsweise wurde die Position von Temperatursensoren falsch definiert. Solche Unstimmigkeiten konnten erst durch oben genannte Plausibilitätsprüfungen entdeckt werden. Es galt also bei der Validierung der Datenpunkte ebenfalls Metadaten zu korrigieren, wenn nötig.

Beim Konfigurieren der Datenexports wurden die Datenpunkte mithilfe der Metadaten definiert. Dabei wurden systematisch alle Messpunkte abgefragt, die später für den digitalen Zwilling des Gebäudes als Eingangs- bzw. Ausgangsdaten dienen.

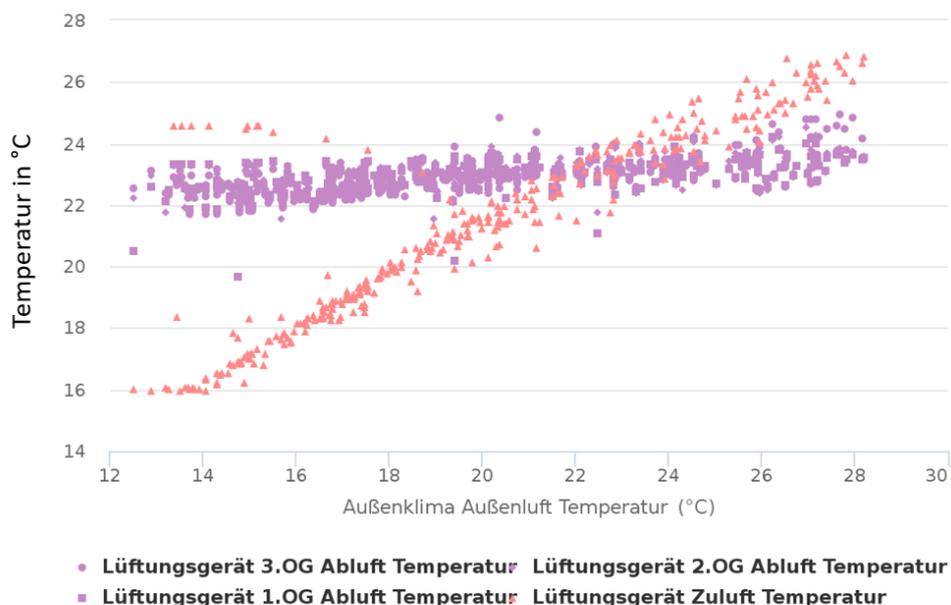


Abbildung 57 Streudiagramm der Zu- und Abluft gegen die Außentemperatur

Eine weitere Form der Datenaufbereitung war die Erstellung von virtuellen Sensoren, um sinnvolle Vor- und Rücklauftemperaturen in den zahlreichen Heiz- und Kühlkreisen zu erfassen. Dazu wurden die Schaltbefehle der dementsprechenden Umwälzpumpen verwendet, um die Temperaturen immer dann auszublenden, wenn die Pumpe nicht lief.

Virtuelle Sensoren wurden ebenfalls verwendet, um Energieflüsse zu berechnen. Da an mehreren Stellen Wärmezähler, statt kombinierten Wärme/Kältezähler eingebaut wurden, mussten diese Sensoren durch virtuelle Sensoren ersetzt werden. Dazu wurden sowohl die Volumenströme als auch die Vor- und Rücklauftemperaturen der entsprechenden hydraulischen Kreise verwendet, um unter Einbezug der spezifischen Wärmekapazität die thermische Leistung zu berechnen, die verbraucht oder erzeugt wurde. Um für das gesamte Gebäude einheitliche Daten zu erhalten, wurden schließlich für alle Wärme- und Kältezähler virtuelle Sensoren eingesetzt.

In Abbildung 58 ist ein solcher virtueller Sensor für die Rücklauftemperatur der Serverkühlung zu erkennen (in blau). Die grüne Kurve zeigt den Schaltbefehl der Umwälzpumpe der Serverkühlung an.

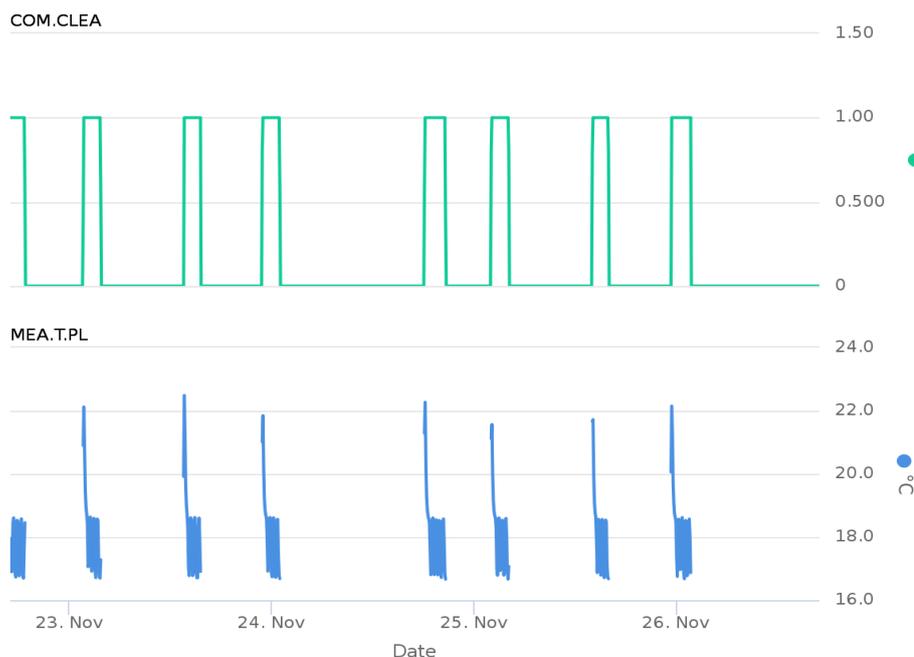


Abbildung 58 Zeitreihendiagramm der Rücklauftemperatur der Serverkühlung

Das Monitoring auf den einsatzfähigen Stand zu bringen war ein iterativer Prozess. Durch ständige Simulationen mit Messdaten aus dem Monitoring und manuelle Datenüberprüfungen konnten Messfehler und Unstimmigkeiten ausfindig gemacht werden.

5.3 Strukturierte Datenabfragen

Die Datenaufbereitung zur Verwendung in den verschiedenen Projektphasen ist eine sich wiederholende und zeitaufwändige Aufgabe, weshalb der gesamte Prozess komplett automatisiert wurde. Der Zweck der Automatisierung besteht darin, Zeit zu sparen und die Genauigkeit im Prozess der Datenaufbereitung zu verbessern. Für die Automatisierung durch Python wurden verschiedene Python-Bibliotheken wie Pandas, NumPy, Selenium, Openpyxl usw. verwendet.

Die Datenaufbereitung besteht aus vier Hauptaufgaben, von denen die letzten drei automatisiert sind:

1. Data Pre-processing (Vorverarbeitung der Daten)
2. Data extraction (Datenentnahme)
3. Data imputation (Zuweisung der Daten)
4. Data consolidation (Konsolidierung der Daten)

Zunächst müssen die wichtigsten Teilaufgaben auf bestimmte Prozesse aufgeteilt werden, die durchgeführt werden, um die endgültigen Daten im erforderlichen Format zu erhalten.

Tabelle 2 zeigt eine Übersicht über die Aufgaben der Datenaufbereitung.

Tabelle 2 Übersicht über Datenaufbereitungsaufgaben

Hauptaufgaben	Unteraufgaben
Data Pre-processing	IoT mondas Plattform: Erstellen von virtuellen Sensoren mit spezifischen Regeln
Data extraction	Erfasste Daten: <ul style="list-style-type: none"> • Rohdaten von mondas • Wetterdaten der allgemeinen Wetterstation der Hochschule Offenburg
Data imputation	Füllen von Datenlücken und deren Klassifizierung
Data consolidation	Daten im gewünschten Format zusammenführen

Der Prozess der Datenaufbereitung muss durchgeführt werden, um als Ergebnis eine "Messdaten-Excel-Datei" zu erhalten, die auch als "Kombinierte Excel-Datei" bezeichnet wird. Diese "Messdaten-Excel-Datei" enthält die Sensor-Rohdaten von mondas im gewünschten Format und wird weiterhin benötigt, um das Simulationsmodell (digitaler Zwilling) des RIZ Energie auszuführen.

Bei der Aufbereitung werden Messlücken, die z.B. durch Datenausfälle entstehen verfullständigt, indem plausible Messdaten aus anderen Zeiträumen verwendet werden. Das Füllen von Messlücken wird nur für diejenigen Sensoren durchgeführt, bei denen in der Simulation kontinuierliche Zeitreihen benötigt werden.

Diese Datenaufbereitung wird einerseits für die Eingabedateien des Simulationsskripts, gleichzeitig aber auch für die Ausgabedaten des Skripts durchgeführt. Bei der Simulation wird dann zunächst der Datensatz der Eingabedaten aufgerufen und ein Datensatz von Ausgabedaten generiert. Dieser Datensatz wird dann in der Auswertung der Simulationsergebnisse mit den gemessenen Ausgabedaten gegenübergestellt und verglichen, um die Qualität der Simulation zu evaluieren.

Es besteht die Möglichkeit die Ergebnisdaten der Simulation auf die Webplattform hochzuladen. Somit kann die Gegenüberstellung von Simulations- und Messdaten direkt in der Monitoringplattform stattfinden.

Abbildung 59 zeigt das Prozessflussdiagramm der Datenaufbereitung und die Aufgaben, die von den Python-Skripten in jedem Schritt des Prozesses ausgeführt werden. Die Abbildung 60 zeigt den Prozess, der in Schritt 4 durchgeführt wird, um die vorbereiteten Daten in die kombinierte Excel-Datei zu übertragen.

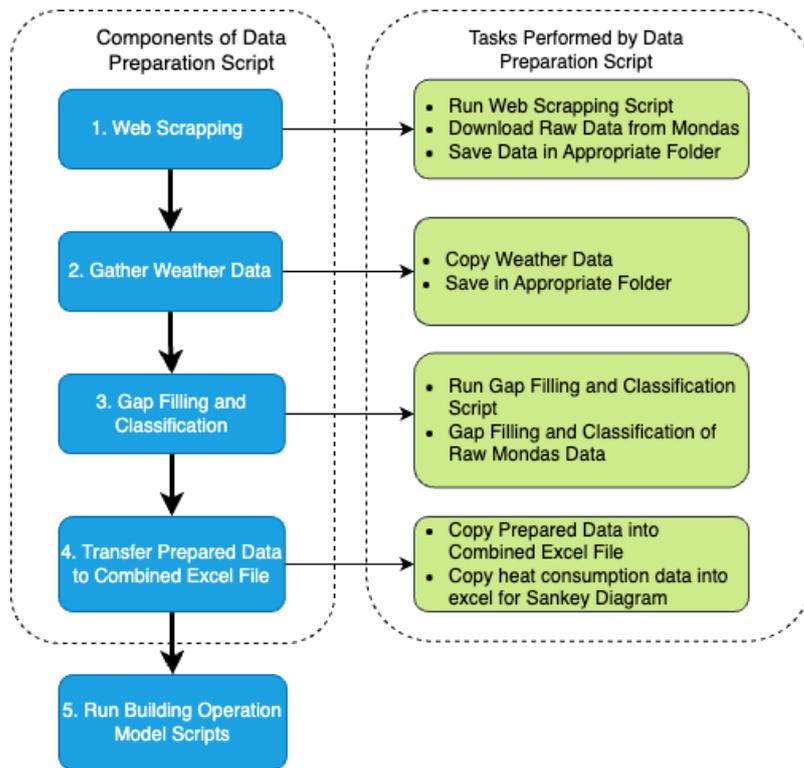


Abbildung 59 Prozessflussbild der Datenaufbereitung vom mondas Export bis zur Eingabedatei für die Simulation. Aufgaben, die von den Python-Skripten ausgeführt werden

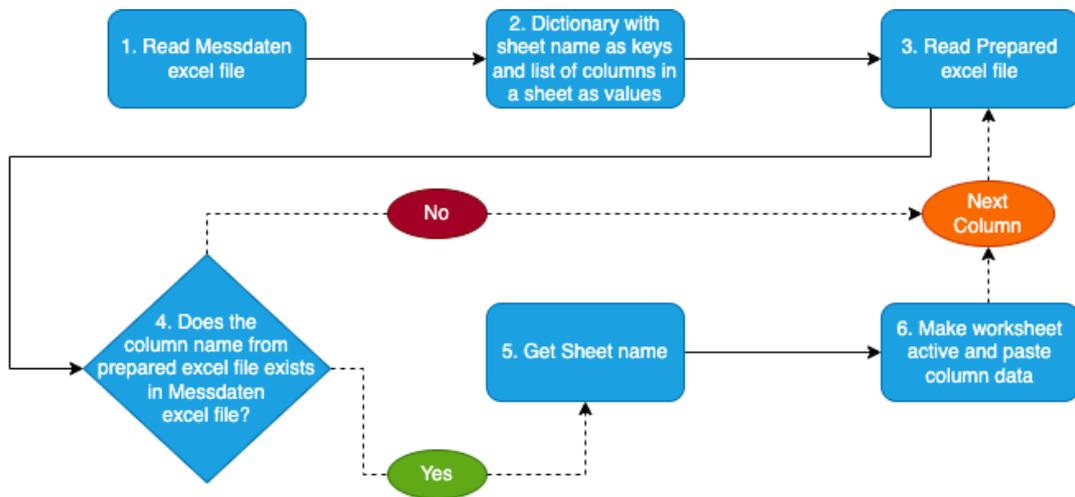


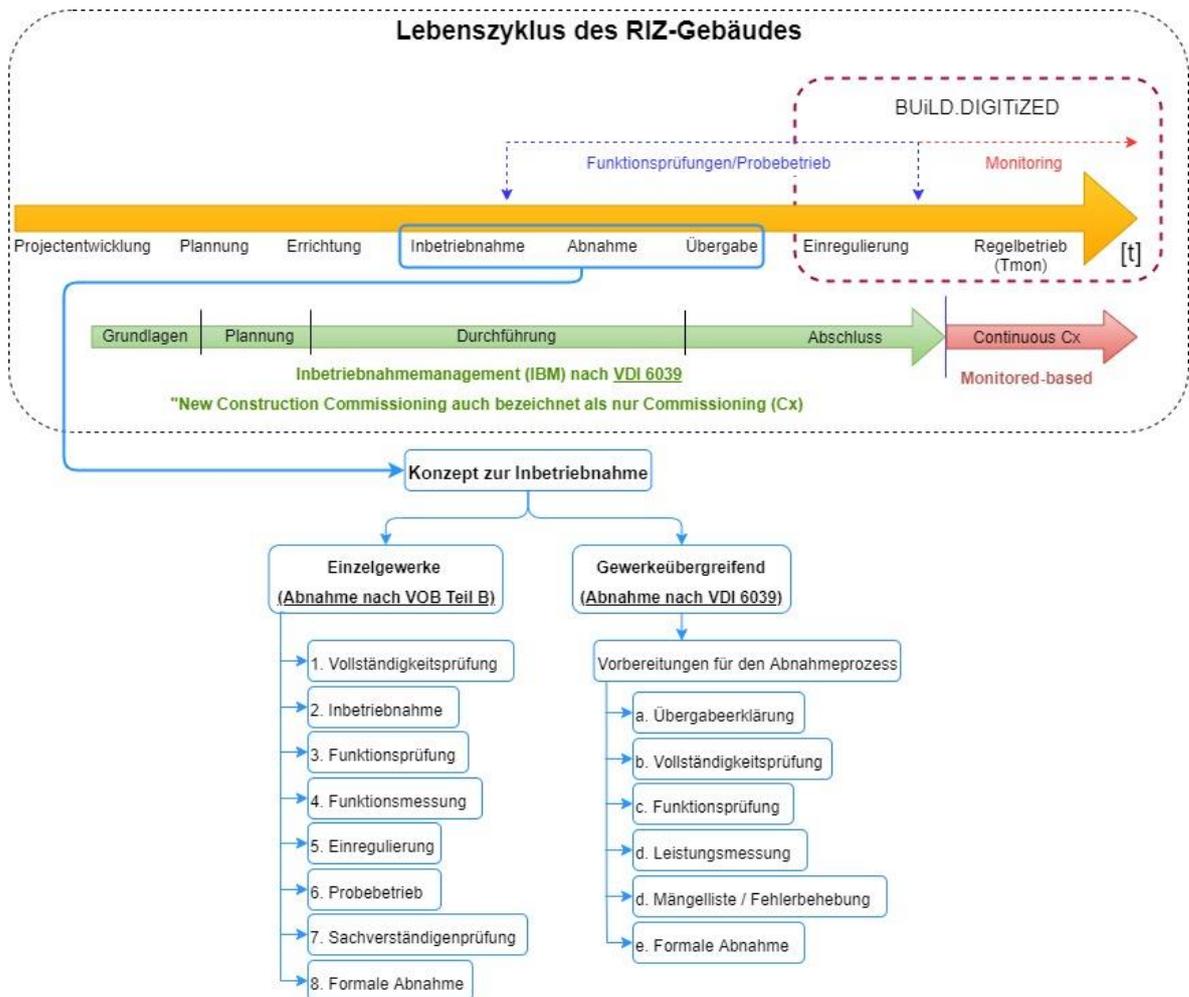
Abbildung 60 Flussdiagramm für die Übertragung der aufbereiteten Daten in die kombinierte Excel-Datei

Weitere Details zu dem Datenaufbereitungsprozess sind im technischen Bericht [12] zu finden.

6 AP4, AP5 und AP6: Inbetriebnahme des RIZ Energie (Hochschule Offenburg)

In der Inbetriebnahmephase des RIZ Energie wurden in dem technischen Bericht „Inbetriebnahme und digitales Monitoring von Gebäuden gemäß Regelwerken“ [13] die relevanten Fehler und ihre konventionelle, wie auch digitale Fehlerbehebung festgehalten. Darüber hinaus wurden darin Richtlinien, ein Schnittstellenkatalog und eine Gewerkebeziehungsmatrix (auf Basis der VDI 6039) aufgeführt. Im Folgenden wird ein Auszug der Erfahrungstabelle detaillierter beschrieben, indem aufgetretene Mängel an digitalen- und konventionelle Fehlererkennungsmethoden gegenübergestellt werden und die Fehlerbehebung skizziert werden. Die vollständige Liste ist im Anhang zu finden. Hierbei sind viele Punkte nicht in digitaler Weise detektierbar oder von der Komplexität der einzubindenden Regeln zu aufwendig, um sie in einem standardisierten Verfahren in den Inbetriebnahmeprozess zu implementieren. Trotzdem wurden vollständigkeithalber die digitalen Fehlererkennungsmethoden angegeben.

Gewerke	Fehler	Manuelle Fehlererkennung	Digitale Überprüfungs-methode	Fehler-behebung
Wasser-anlagen	Grundwasserpumpen in GLT vertauscht	Testbetrieb der Grundwasserpumpen	Nicht möglich	Neuzuweisung
TABS/FBH	Wasserleckagen in der FBH	Thermografie zur Lokalisierung der Leckstellen im Beton und Reparatur der Kreisläufe durch einen	Nicht möglich	Bypass der beschädigten Rohre
TABS	Heizkurve muss angepasst werden	Nicht möglich	Raumtemperatursimulation durch digitalen Zwilling	Anpassen der Heizkurve in der GLT
TABS	Vorlauftemperatur der TABS und Speicheranforderung nicht auf eingestelltem Sollwert	Nicht möglich	Überwachung der Wassertemperaturen und Gegenüberstellung mit Sollwerten	Überprüfung der GLT Programmierung
Server-kühlung	Schwierigkeiten bei der Einhaltung der Sollwerte der Prozesskühlung		Überwachung der Raumtemperatur	Parametrierung des Regelungssystems gemäß der Funktionsbeschreibung
Server-kühlung	Dreiwegeventil blockiert	Solltemperatur nicht erreicht, Ventil immer in gleicher Position	Nicht möglich, da kein Rückmeldesignal im Monitoring vorhanden ist	Mit Öl wieder gängig gemacht
Arbeitsplatz-qualität	Jalousieabsenkung für den sommerlichen Wärmeschutz zu früh/ zu spät	Beobachtung des Absenckverhaltens der Jalousien	Gegenüberstellung der Strahlungswerte (an der Westfassade) mit den Positionswerten der Jalousien	Anpassen des Grenzwerts in der GLT



Der zeitliche Ablauf der Entstehungsphase des RIZ Energie sah folgendermaßen aus:

- 08./2014: Vorbereitung
- 07/2015: Planung
- 01/2016: Abgabe der Bauunterlage
- 05/2018: Baubeginn:
- 18.06.2020: Übergabe des RIZ Energie
- 30.06.2023: Ende der Inbetriebnahme

Die Inbetriebnahme des Gebäudes startete mit der Übergabe und endete mit Abschluss des Projekts am 30.06.2023.

7 AP7: Energieeffizienz (Konzmann Gebäudetechnik GmbH)

7.1 Energiedatenanalyse

Die energetische Bewertung ist ein Verfahren zur Ermittlung des energetischen Zustands eines Gebäudes oder Systems. Grundlage der energetischen Bewertung sind alle Daten oder Informationen, die dazu geeignet sind, Verbesserungsmöglichkeiten zu identifizieren. Im konkreten Fall des RIZ Energie handelt es sich um die gemessenen und simulierten Daten unseres Gebäudes.

Als Methode zur Analyse des Energieeinsatzes und -verbrauchs erfolgt im ersten Schritt die Ermittlung der eingesetzten Energieträger (beziehungsweise Energiequellen im Falle des Grundwassers), die Sonne als Primärenergieträger, sowie der Energieerzeugung aus der PV-Anlage und dem Energieverbrauch für den Betrieb der Grundwasserpumpen, der Wärmepumpe und der Hilfskomponenten wie Umwälzpumpen. Mit Hilfe der im RIZ Energie installierten Stromzähler und Wärmemengenzähler wird die Durchführung dieser Energiedatenanalyse wesentlich erleichtert, da die meisten Stromverbrauchs- und Wärmemengenwerte für jede der Hauptkomponenten, besonders der Heizungsanlage vorliegen. Für die Hilfskomponenten lagen aufgrund eines technischen Fehlers zeitweise keine Stromverbrauchsdaten vor. Diese konnten aber für die entsprechenden Zeiträume über ein Regressionsverfahren durch den gemessenen Volumenstrom und den Herstellerdaten des elektrischen Verbrauchs der Pumpen über ein Python-Algorithmus berechnet werden.

Die vorgenannten Daten wurden von der mondas-Plattform für den zu analysierenden Zeitraum heruntergeladen. Mit diesen Daten und der Anwendung der in [14] beschriebenen Methode der 4 Bilanzgrenzen (siehe Abbildung 61) wurde u.a. der End- und Primärenergieverbrauch des Gebäudes für Heizung bzw. Kühlung ermittelt. Dies geschah über eine Bewertung der Energieeffizienz der Systeme im Heiz- und Kühlbetrieb (ausgedrückt als seasonal performance factor, SPF) und des Hilfsenergieverbrauchs zum Heizen und Kühlen durch thermoaktive Bauteilsysteme (TABS), sowie im primären und sekundären Hydraulikkreislauf im Heiz- und Kühlbetrieb. Dazu wurde auch die Autarkie des Gebäudes auf Basis der elektrischen Energieerzeugung der PV-Anlage und des elektrischen Energieverbrauchs des Gebäudes ermittelt, der zu erwartende Energieverbrauch für die nächste Periode geschätzt und die Einhaltung der Rechtsvorschriften sichergestellt (z.B. Wasserrechtliche Erlaubnis zur Nutzung des Grundwassers).

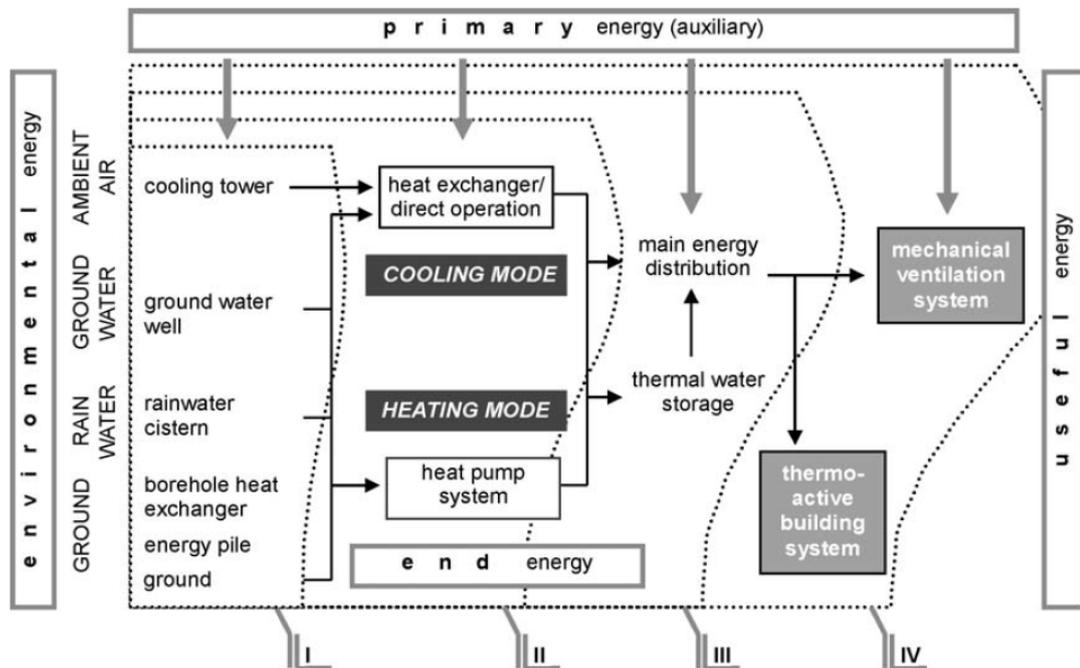


Abbildung 61 Angewandte Methodik für die Energie- und Effizienzbewertung gemäß den vier definierten Bilanzgrenzen I-IV. Umweltenergie, die aus Grundwasser, Erd- oder Umgebungsluft gewonnen wird (I), wird entweder mittels einer Wärmepumpe zur Heizung oder über einen Wärmeaustauscher zur Kühlung verwendet (II). Die Heiz- und Kühlenergie wird in einem Wasserspeicher gespeichert, dann im Gebäude weiter verteilt (III) und schließlich über thermoaktive Gebäudesysteme und/oder eine Lüftungseinheit in die Räume geliefert (IV) [14].

Nach der Analyse der Gebäudebetriebs- und Energieeffizienzdaten in unserer Methodik wurde der digitale Zwilling verwendet, um die Energiewerte (Strom und Heizung/Kühlung) zu simulieren und dann dieselben Werte, die bereits mit den Messungen berechnet wurden, neu zu berechnen. Ziel war es dabei, erstens das Simulationsmodell zu validieren, um die Parametrisierung zu verbessern, zweitens verschiedene Strategien zu testen, um die Energieeffizienz der Systeme zu optimieren ohne Parameter der Funktionsbeschreibung des Gebäudes im laufenden Betrieb ändern zu müssen und drittens eine modellbasierte Fehlererkennung und -diagnose von Systemen wie der Lüftungsanlage und TABS durchzuführen.

7.2 Evaluation der Energieeffizienz im RIZ-Gebäude

Die Vornormenreihe DIN V 18599 „Energetische Bewertung von Gebäuden“ stellt ein Verfahren zur Bewertung der Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden zur Verfügung. Die Berechnungen erlauben die Beurteilung aller Energiemengen, die zur bestimmungsgemäßen Heizung, Warmwasserbereitung, raumluftechnischen Konditionierung und Beleuchtung von Gebäuden notwendig sind.

Zum Bau des RIZ Energie wurde 2015 ein Energiebedarfsausweis für Nichtwohngebäude nach EnEV 2014 DIN V 18599 von der Firma Stahl+Weiß PartGmbH erstellt. Dieser gibt den energetischen Stand des Neubaus aus den Planungsdaten, in Form eines Energieausweises an. Vorhandene Messdaten sollen diese Angaben wie oben beschrieben überprüfen.

Zur Validierung der Vorbewertung werden die vorhandenen Messdaten gesammelt, die für sinnvoll erachteten Maßnahmen umgesetzt und mit der Energieberatungskompetenz der Firma Konzmann nach der DIN V 18599 bewertet. Ziel ist eine Neubewertung der verbrauchten Primär-, und Endenergiemengen.

Zur Evaluation der Energieeffizienz des RIZ-Gebäudes wird zunächst die Energiebilanz der Auslegungsdaten analysiert (siehe Abbildung 62). Die Energieanteile werden jeweils für die PV-Anlage, sowie das Heiz- und Kühlsystem betrachtet.

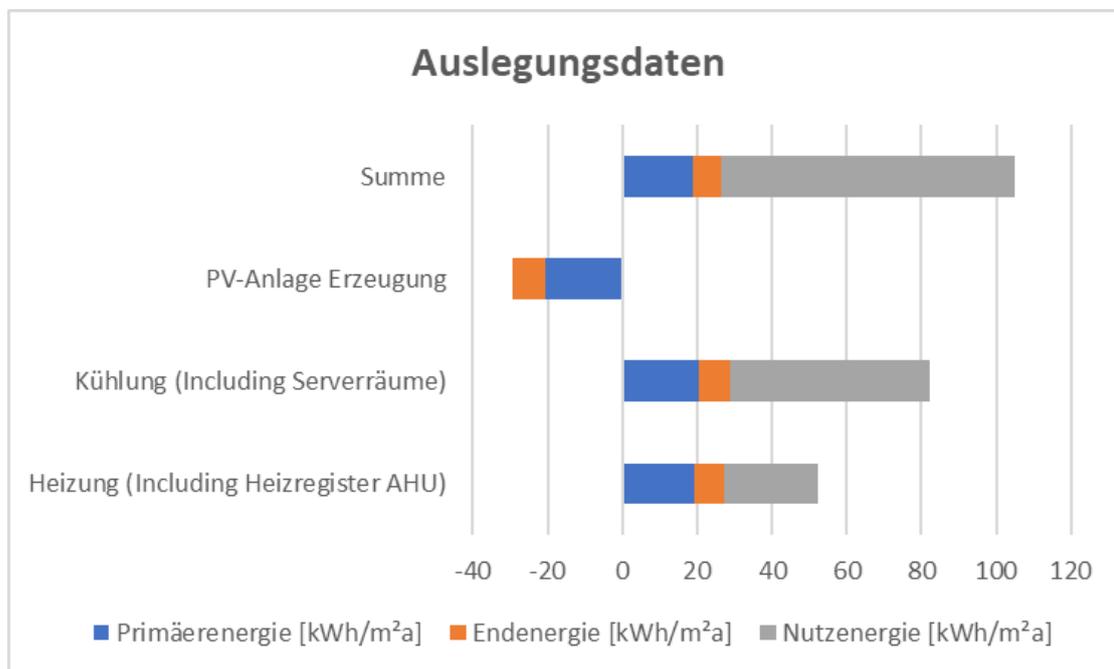


Abbildung 62 Primär-, End- und Nutzenergie der Auslegungsdaten für Heizung, Kühlung und PV-Anlage nach EnEV 2014 DIN V 18599

Weiterhin zeigen Abbildung 63 und Abbildung 64 die Energiebilanzen für die Simulations- und Messdaten.

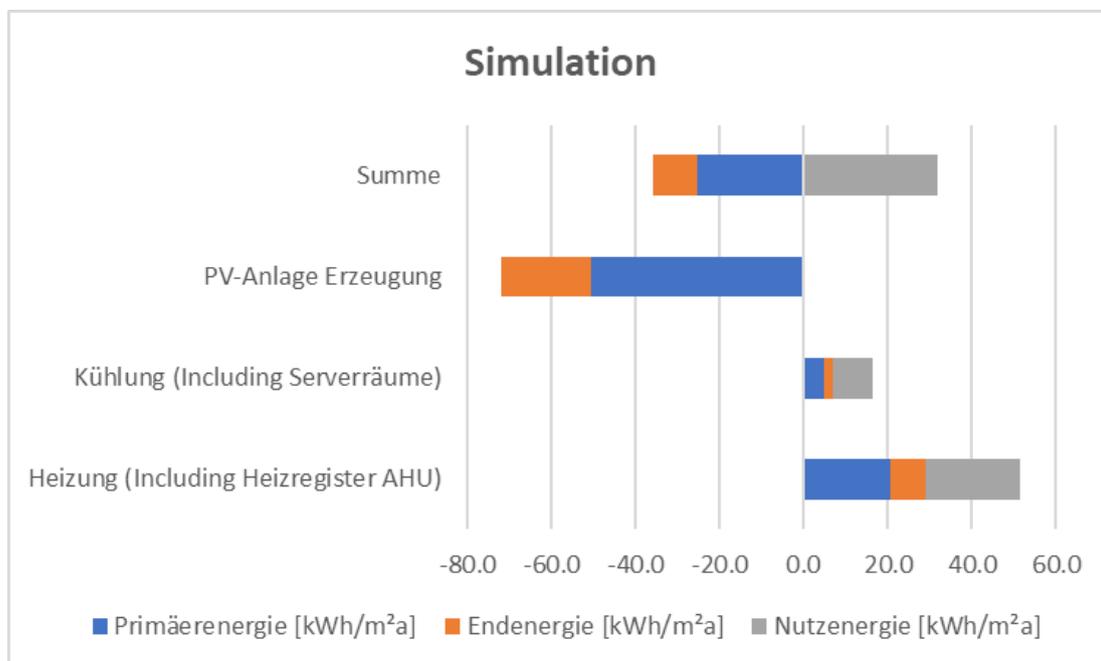


Abbildung 63 Primär-, End- und Nutzenergie der Simulationsdaten für Heizung, Kühlung und PV-Anlage

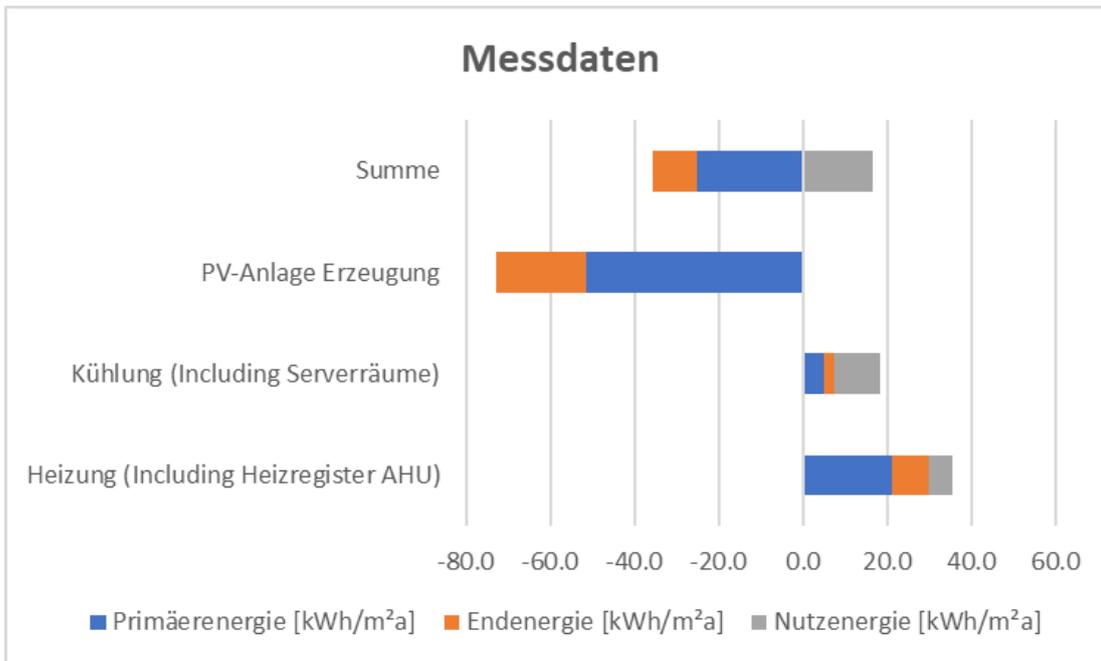


Abbildung 64 Primär-, End- und Nutzenergie der Messdaten für Heizung, Kühlung und PV-Anlage

Nun können abschließend die Primär-, End- und Nutzenergie der Auslegung, Simulation und Messdaten miteinander verglichen werden (siehe Abbildung 65).

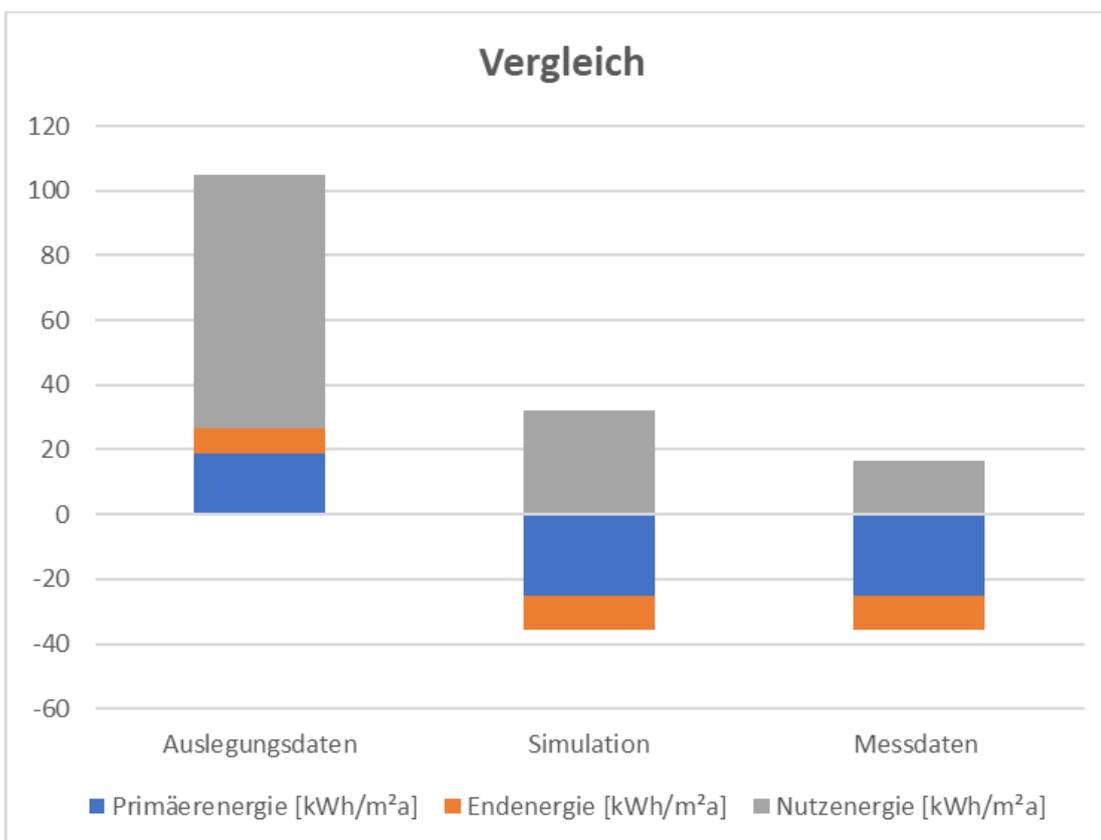


Abbildung 65 Vergleich der Energiebilanzen der Auslegungs-, Simulations- und Messdaten

Es fällt auf, dass sich die Auslegungsdaten stark von den Simulations- und Messdaten unterscheiden. Bei genauerer Betrachtung wird deutlich, dass das an mehreren Energiemengen liegt, die in ihrer Annahme stark von der Realität abweichen. Für die PV-Anlage sehen die Auslegungsdaten eine Endenergie von 8,7 kWh/(m²a) vor, während sowohl die Mess- als auch Simulationsdaten eine Endenergie von ca. 21 kWh/(m²a) ergeben. Es scheint so als wäre von einer erheblich geringeren Leistung der PV-Anlage ausgegangen worden.

Ebenfalls stimmen die ausgelegten Daten für die Kühlung nicht mit den anderen Daten überein. Besonders für die Nutzenergie der Kühlung wurden 53,3 kWh/(m²a), was die gemessene und simulierte Nutzenergie von ca. 10 kWh/(m²a) deutlich übersteigt. Zu bedenken ist hierbei, dass im Laborbetrieb noch keine Vollausslastung der Prozesskälte durch die noch nicht abgeschlossene Inbetriebnahme der Einzellabore abgeschlossen ist. Deshalb kann davon ausgegangen werden, dass die benötigte Nutzenergie der Kühlung bei Vollausslastung der Laboranlagen in Zukunft steigen wird.

Die Energiebilanz der Simulation und des realen Betriebs stimmen jedoch abgesehen von Abweichungen des Heizungssystems sehr gut überein. Wir werden im weiteren Verlauf des Projekts die Auslegungsdaten weiter analysieren und mit dem realen Betrieb vergleichen.

In Anlehnung an [14] wurden schließlich die Effizienzkennzahlen in den 4 Bilanzgrenzen berechnet. Hierzu wurden sowohl die Messdaten als auch die Simulationsdaten betrachtet, um die Methode gleichzeitig auch als Evaluation der Simulation zu nutzen.

Abbildung 66 zeigt das vereinfachte Energiesystem inklusive der 4 Bilanzgrenzen, die in Anlehnung an die DIN V 18599 definiert wurden:

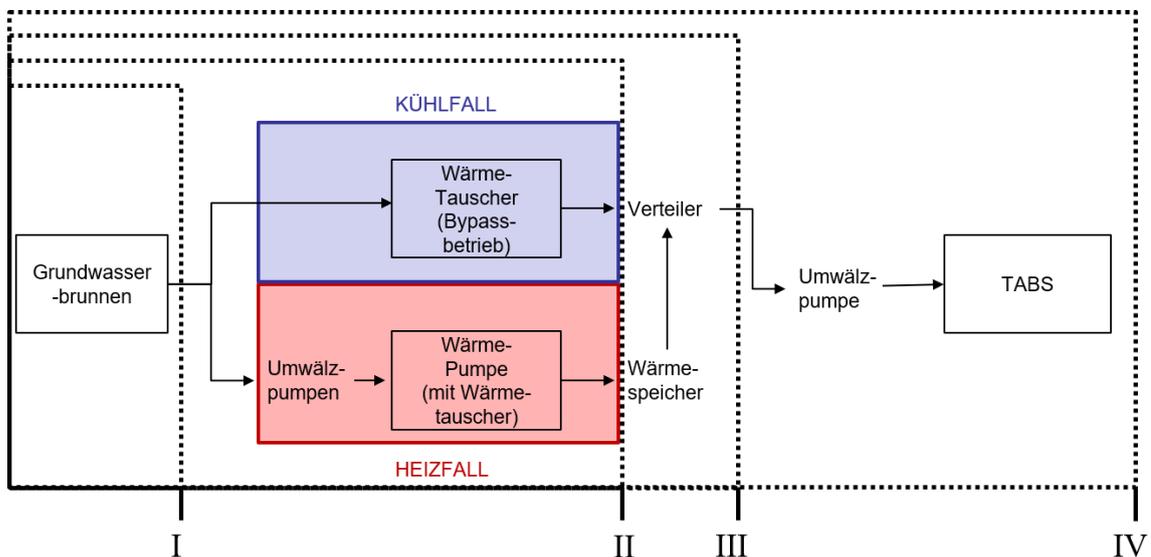


Abbildung 66 Energiesystem RIZ mit 4 Bilanzgrenzen

Die Arbeitszahlen SPF I-IV bewerten für das gesamte Energiesystem folgende Prozesse:

- I. Bereitstellung der Umweltenergie aus dem Grundwasser
- II. Erzeugung von Wärme durch die Wärmepumpe / Kälte über Wärmetauscher
- III. Speicherung der Wärme
- IV. Übergabe der Wärme/Kälte an die Büroräume mittels TABS

Für die Berechnung der Arbeitszahlen wurden folgende Gleichungen (I-IV) verwendet:

$$(I) \quad SPF I = \frac{Q_{hc,f}}{W_{hc,f}}$$

$$(II) \quad SPF II = \frac{Q_{hc,f} + Q_{hc,gen}}{W_{hc,f} + W_{h,gen}}$$

$$(III) \quad SPF III = \frac{Q_{hc,f} + Q_{hc,gen}}{W_{hc,f} + W_{h,gen} + W_{d,Strom}}$$

$$(IV) \quad SPF IV = \frac{Q_{hc,f} + Q_{hc,gen}}{W_{hc,f} + W_{h,gen} + W_{d,Strom} + W_{hc,cc}}$$

Mit:

$Q_{hc,f}$	Endenergie Heiz- und Kühlsystem in kWh
$Q_{hc,gen}$	Endenergie Wärmeerzeugung in kWh
$W_{hc,f}$	Hilfsenergie Heiz- und Kühlsystem in kWh
$W_{h,gen}$	Hilfsenergie Wärmeerzeugung in kWh
$W_{d,Strom}$	Hilfsenergie Verteilung in kWh
$W_{hc,cc}$	Hilfsenergie Übergabe in kWh

Abbildung 67 bis Abbildung 70 zeigen die Evaluationsergebnisse der einzelnen Bilanzgrenzen jeweils für die Messdaten sowie für die Simulationsdaten:

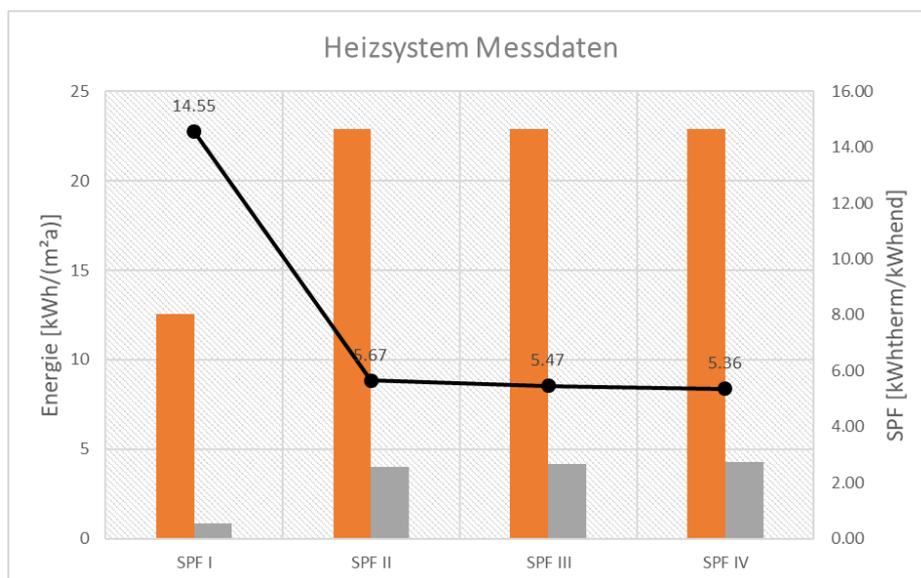


Abbildung 67 Energiebilanz der Heizenergie des RIZ-Gebäudes mit Arbeitszahlen für die 4 Bilanzgrenzen

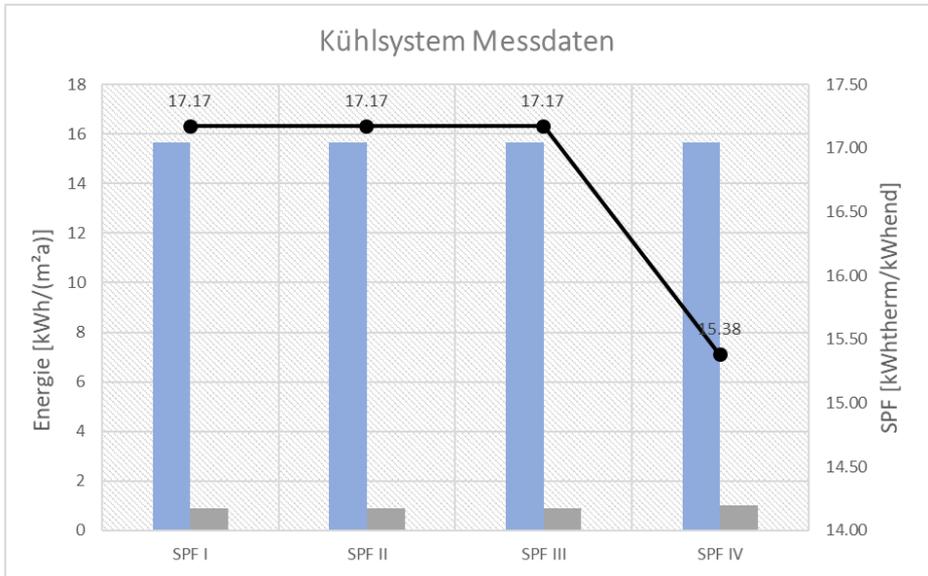


Abbildung 68 Energiebilanz der Kühlenergie des RIZ-Gebäudes mit Arbeitszahlen für die 4 Bilanzgrenzen

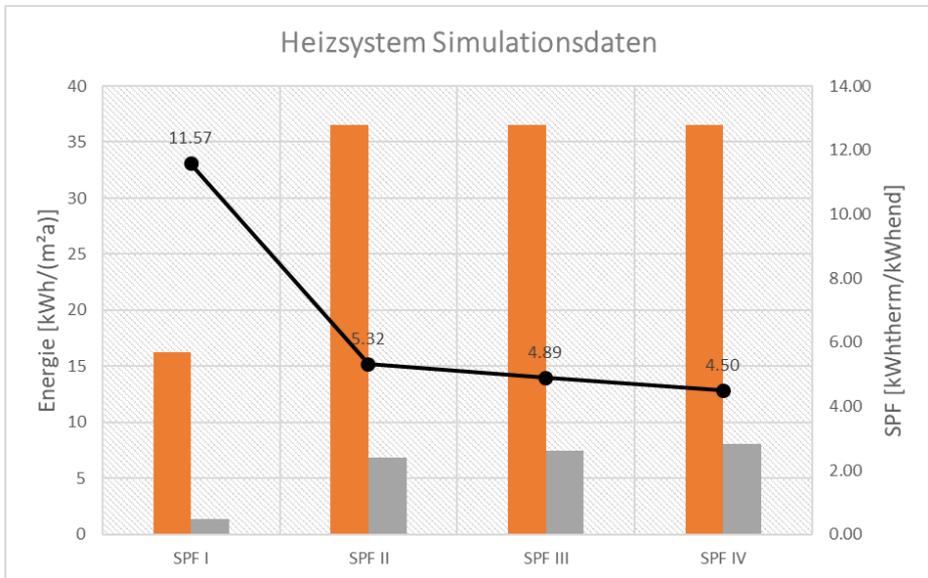


Abbildung 69 Energiebilanz der Heizenergie des digitalen Zwillings mit Arbeitszahlen für die 4 Bilanzgrenzen

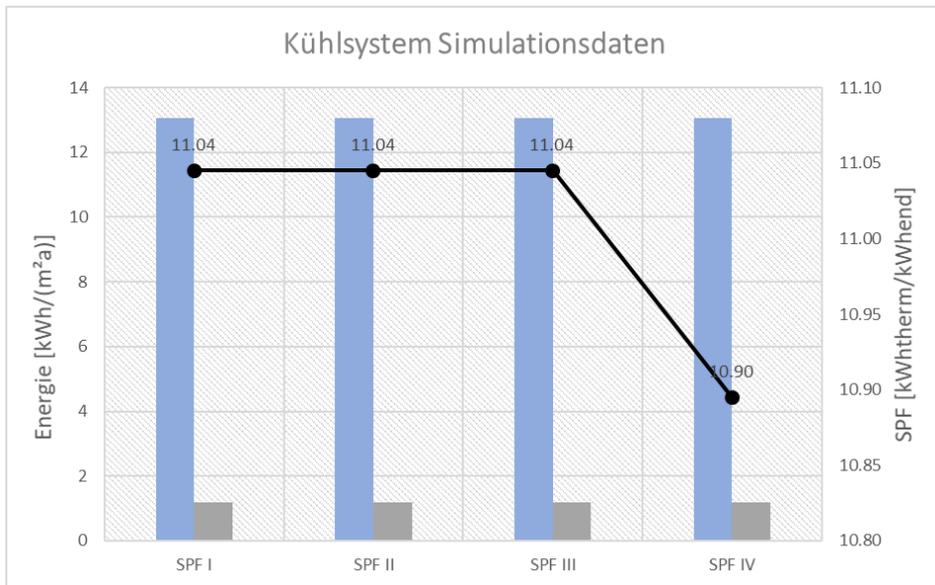


Abbildung 70 Energiebilanz der Kühlenergie des digitalen Zwillings mit Arbeitszahlen für die 4 Bilanzgrenzen

Die Ergebnisse zeigen überraschenderweise, dass die Messwerte höhere Arbeitszahlen erzielen als die Simulationswerte und der reale Gebäudebetrieb somit teilweise effizienter ist als durch die Simulation angenommen.

Für beide Fälle beobachtet man im Heizfall erwartungsgemäß nach der ersten Bilanzgrenze den höchsten Abfall der Arbeitszahlen. Die Bereitstellung von Umweltenergie durch Grundwasserbrunnen ist sehr effizient und energetisch nicht aufwendig. Speicherung und Verteilung durch Wärmespeicher und Umwälzpumpen senken die Effizienz weiter, sodass wir für die Simulationsdaten einen endgültigen Performancefaktor von 4,50 und bei den Messwerten 5,36 erreichen.

Der Kühlfall ist im Energiesystem des RIZ Energie einfacher, da in den ersten drei Bilanzgrenzen die Effizienz annähernd gleichbleibt. Bei der Übergabe an die TABS beobachtet man die einzige Absenkung der Effizienz und es werden als endgültiger Performancefaktor für Simulation und realen Betrieb jeweils 10,90 bzw. 15,38 erreicht.

7.3 Energieflussbild nach DIN 18599

Visuelle Tools sind eine einfache und nützliche Methode zur Erkennung von Problemen und Verbesserungsmöglichkeiten beim Betrieb eines Gebäudes. Es wird empfohlen, die Mindestanforderungen der AMEV-Richtlinie „Technisches Monitoring“ zu befolgen, die definieren welche messtechnische Ausstattung nötig ist, um den energieeffizienten und bedarfsgerechten Gebäudebetrieb zu ermöglichen. So wird gewährleistet, dass die wichtigsten Kenngrößen rund um die Energieeffizienz in den Gebäudesystemen überwacht werden.

Ein Sankey-Diagramm zeigt den Energiefluss (hier in kWh/Monat) als mengenproportionale Pfeile zwischen zwei „Knoten“. Diese repräsentieren Prozesse, Systemkomponenten oder Geräte und stellen so auch die Struktur von Systemen dar. Sankey-Diagramme sind daher eine leistungsfähige Alternative zu Balken- und Kreisdiagrammen, wenn Einsparpotenziale identifiziert werden sollen. Abbildung 71 zeigt ein automatisch generiertes Sankey-Diagramm des RIZ Energie.

Dezember 2022 (Messdaten)

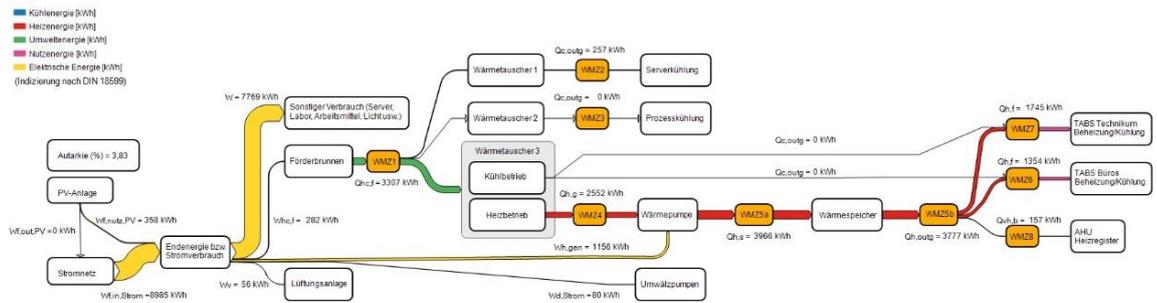


Abbildung 71 Sankey-Diagramm des RIZ Energie, bezeichnet nach DIN 18599. WMZ ist die Abkürzung für Wärmemengenzähler.

So können beispielsweise Teilenergiekennwerte bestimmt werden: Werden die Strommenge $W_{h,gen}$ für den Betrieb der Wärmepumpe und die bereitgestellte Wärmemenge WMZ 5a analysiert, ergibt sich eine Anlagenaufwandszahl für die Wärmepumpe von $egen=3,4$. Der Vergleich von WMZ 5b zu 5a zeigt eine sehr gute Anlagenaufwandszahl für die Wärmespeicherung von $es=0,95$. Die Aufwandszahl für die Verteilung und Übergabe beträgt $ed+ce=0,86$ und liegt im typischen Bereich für Flächentemperiersysteme. Somit steht eine übersichtliche Grafik zur Verfügung, um signifikante Verluste zu visualisieren und zu bewerten. Dies ist eine gute Möglichkeit, insbesondere in denjenigen Bereichen Fehler zu erkennen bzw. das Potenzial für eine betriebsbegleitende Optimierung abzuschätzen, die von Algorithmen der modellbasierten Fehlererkennung nicht erfasst werden.

7.4 Einordnung der Performance des RIZ Energie

Nun sollen die Performanceparameter des RIZ Energie bewertet werden. Dazu kann der reale Betrieb des Gebäudes den Planungsdaten gegenübergestellt werden. Weiterhin bietet es sich an diese im Kontext ähnlicher Gebäude zu beurteilen. Im Projekt ENOB:dataNWG [15] wurden bereits Daten zur Erfassung der Struktur und der energetischen Qualität von Nichtwohngebäuden in Deutschland erhoben. Durch einen Vergleich mit diesen Daten in Tabelle 3 kann die Performance des RIZ Energie im Sektor der Nichtwohngebäude eingeordnet werden.

In der Planungsphase des Gebäudes wurde ein Energiebedarfsausweis nach DIN V 18599 erstellt. Der Energiebedarfsausweis dient dazu Energieverbrauch und -effizienz eines Gebäudes zu quantifizieren. Dadurch kann ermittelt werden ob Energieeinsparmaßnahmen erforderlich sind. Zusätzlich bietet er die Möglichkeit Gebäude hinsichtlich Primär- und Endenergieverbrauch miteinander zu vergleichen.

Im Rahmen des Projekts wurde der Energiebedarfsausweis in einem ersten Schritt dazu verwendet die Plausibilität des Energiemonitorings zu validieren. Abbildung 72 zeigt eine Gegenüberstellung des Primär- und Endenergiebedarfs des RIZ Energie gemäß dem Energiebedarfsausweises und den realen Messdaten. Wie hier zu sehen ist liegen die Messwerte des Energiemonitorings leicht unterhalb der Werte der Plandaten. Das zeigt, dass der reale Betrieb des RIZ Energie sogar etwas energieeffizienter als geplant verlief.

Tabelle 3: Performance des RIZ Energie im Vergleich zu ENOB Gebäuden (alle Angaben in kWh/m2a)

Gebäude	Verbrauch sonst. Energieträger	Stromverbrauch	Stromerzeugung	bilanzieller Endenergieverbrauch
LAM	15,65	12,61	-6,96	21,30
BOB		31,30		31,30
BSU	9,57	22,17		31,74
PWH		46,96		46,96
ZAG	7,39	43,91	-13,91	37,39
SIC	32,17	20,43	-5,22	47,39
HDR	34,35	19,13		53,48
EGN	27,83	26,09	-2,61	51,30
EFB	42,17	24,35	-2,61	63,91
POL	54,78	19,57	-2,17	72,17
DBN	57,83	23,48		81,30
ECO	43,91	38,26	-3,48	78,70
UBA	69,57	25,65	-1,74	93,48
KFO	118,26	36,52		154,78
CEN	128,70	47,39	-44,78	131,30
BEK	24,78	6,96		31,74
DEB	90,00	29,57		119,57
EBR	116,09	21,30		137,39
KFW	126,96	47,83		174,78
RIZ		28,35	-7,83	20,52

Energiebedarfsvergleich 2022 (ohne Technikum)

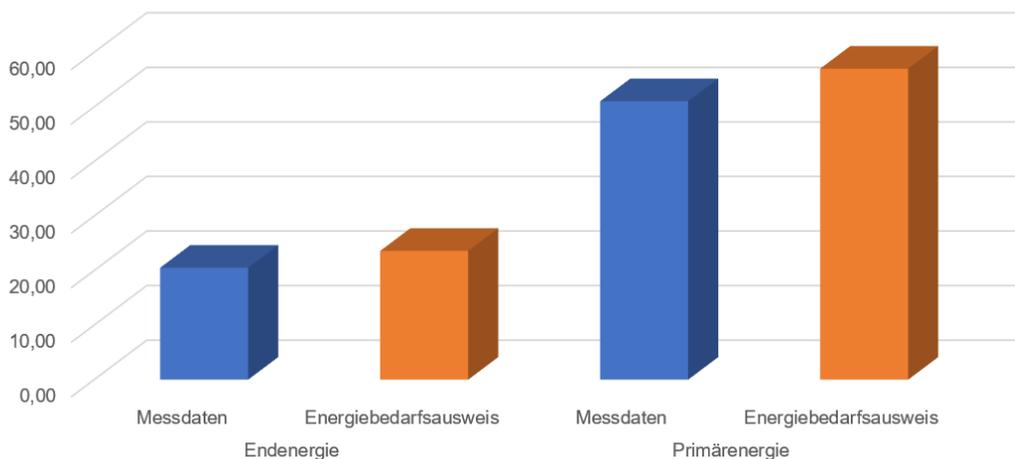


Abbildung 72: Vergleich der Primär- und Endenergie des geplanten und realen Gebäudebetriebs

Nun kann die Performance des RIZ Energie mit anderen Nichtwohngebäuden verglichen werden. Wie in Abbildung 73 zu sehen ist, schneidet das RIZ Energie beim spezifischen Endenergieverbrauch besser ab, als die Demonstrationsgebäude der ENOB Forschungsinitiative.

In Abbildung 74 wird das ebenfalls durch die Darstellung der bilanzierten spezifischen Endenergieverbräuche deutlich.

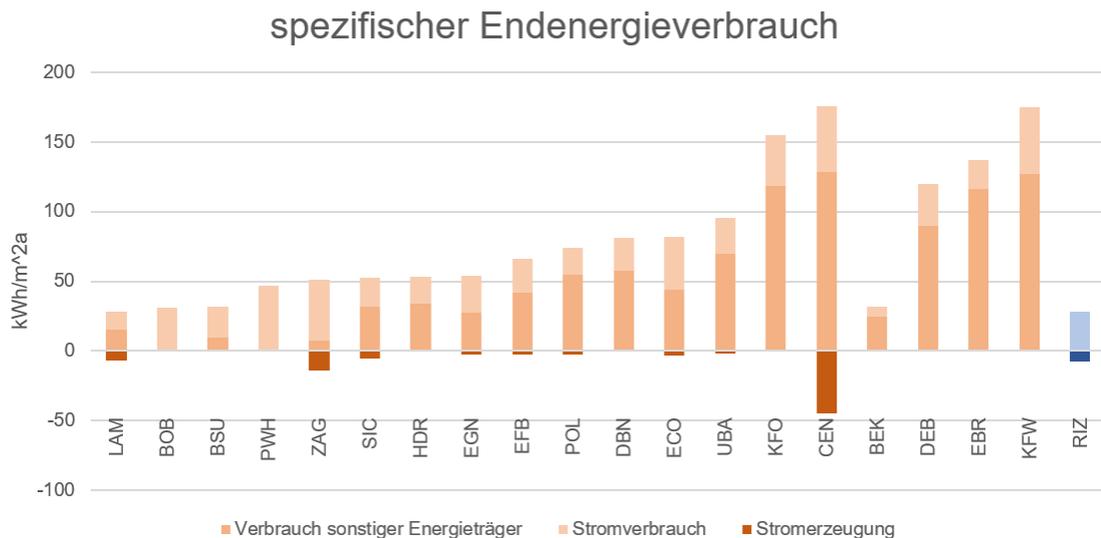


Abbildung 73: Endenergieverbräuche für Wärme, Kälte, Beleuchtung und Lüftung in untersuchten ENOB Nichtwohngebäuden und dem RIZ Energie inklusive Stromerzeugung

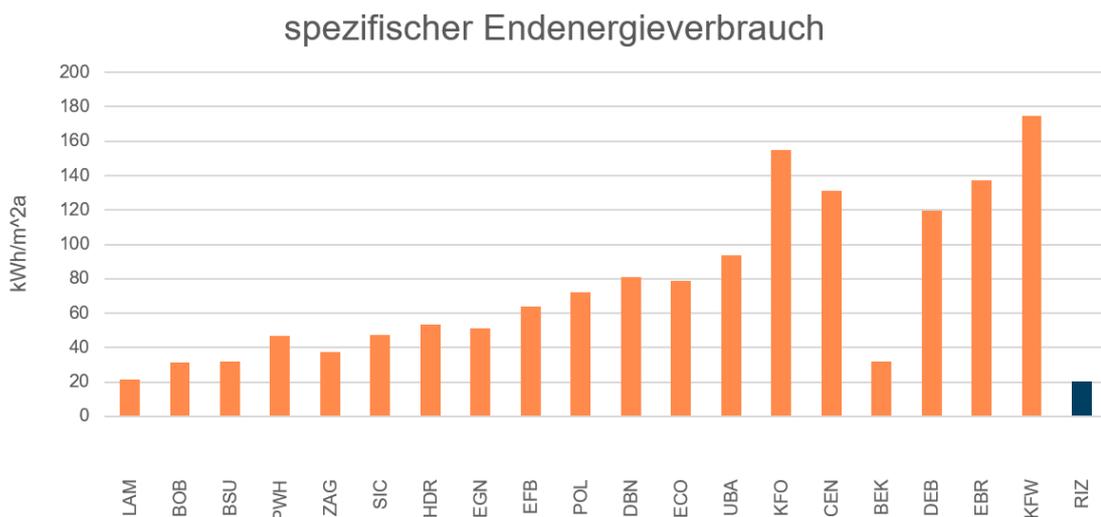


Abbildung 74: Bilanzierter Endenergieverbräuche für Wärme, Kälte, Beleuchtung und Lüftung in untersuchten ENOB Nichtwohngebäuden und dem RIZ Energie

7.5 Energieeinsparmaßnahmen

Durch die Analyse der gebäudetechnischen Anlagen konnten Energieeinsparungsmaßnahmen ermittelt werden, die unter ingenieurmäßigen Gesichtspunkten bewertet wurden. Eine zusammenfassende Analyse des Energieeinsparpotentials ist im entsprechenden technischen Bericht [16] zu finden. Aufgrund der Energieeinsparmaßnahmen konnte die Gebäudedokumentation angepasst und in der Funktionsbeschreibung ergänzt werden. Die Vervollständigung der Dokumentenbibliothek durch tieferegehende Systemanalysen, eröffnen weitere Potenziale zur Verbesserung des Gebäudebetriebs. Energieeinsparmaßnahmen unterstützen außerdem den Gedanken eines netzdienlichen Gesamtbetriebs, durch Entlastungen des Energienetzes und die Glättung von Bedarfsspitzen.

7.5.1 Maßnahmen

Verschiedene Maßnahmen aus dem technischen Bericht zu Energiesparmaßnahmen wurden umgesetzt.

Arbeitsplatzleuchten

Einzelne Arbeitsplatzleuchten wurden von der Helligkeit und Leuchtdauer, sowie Ein- und Ausschaltverhalten angepasst. Durch die Beschaffung eines IR-Dongles und Problemen bei der technischen Umsetzung kam es zu Verzögerungen. Die Beleuchtungsstärke wurden auf 50 % (500 Lux) und die Haltedauer von 15 Minuten auf 5 Minuten reduziert. Ob die Beleuchtungsstärke und Haltedauer dem optischen Komfort entsprechen, wird gerade erprobt. Auch soll für die genaue Stromersparnis ein Stromzähler, der in eine Schukodose eingesteckt werden kann verwendet werden. Somit kann die Stromersparnis genau bestimmt werden.

Externe Regelung der Anzahl der Wärmepumpenstufe

Es wurde eine Schnittstelle in der Gebäudeleittechnik erstellt, wodurch eine externe Regelung der Wärmepumpe über mondas IOT vorgenommen werden kann. Dies ermöglicht die Verwendung der Gebäudemessdaten als Grundlage für externe Regelalgorithmen, welche die Wärmepumpe zu berechneten Zeiten ein und ausschalten kann. Diese Erweiterung wurde allerdings zum netzdienlichen Betrieb der Wärmepumpe anhand prognostizierter Strompreise (als Grundlage für die Netzauslastung) verwendet, anstatt dem primären Grund der Energieersparnis. Hintergrund dafür ist neben dem für uns interessanteren Nutzen der Netzdienlichkeit die Anlagensicherheit. Weitere Informationen dazu werden in Kapitel 9.1 gegeben.

Nutzung der Sekundärkälte der Wärmepumpe zur Serverkühlung

Dies wurde aufgrund des hohen Aufwands und Kosten nicht umgesetzt. Darüber hinaus muss bei der Serverkühlung die Mindestdurchflussmenge der Grundwasserpumpen gewährleistet werden.

Optimierung der Regelstrategie von thermischen Verbrauchern

Mehrere Maßnahmen wurden ergriffen, um die Vorlauftemperatur im Sekundärkreis der Wärmepumpe zu senken. Zunächst wurden die Einstellungen für die Temperaturen der Heizregisterpumpe herabgesetzt, damit die Lüftungsanlage nicht tonangebend bei der Anforderung der Wärmepumpe ist und bei einer Heizregisteranforderung die Solltemperatur der Wärmepumpe nicht erhöht wird. Als zweiter Schritt wurden die Raumtemperaturen auf die von der Bundesregierung in ihren Maßnahmen zum Energiesparen geforderten Grenzen von 19°C reduziert. Als dritter Schritt wurden die Vorlauftemperaturen der thermischen Bauteilaktivierung mit einem Simulationsmodell auf Basis von DIN ISO 13790 ermittelt. Dadurch konnte die Vorlauftemperatur im Sekundärkreis der Wärmepumpe nochmals reduziert werden.

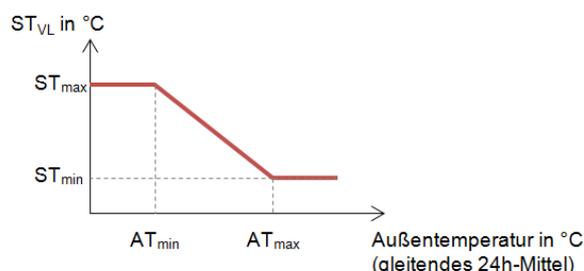


Abbildung 75 Schematische Darstellung der Heizkurve

Dadurch ergeben sich in Tabelle 4 die optimierten Parameter für die Heizkurven wie in Abbildung 75 und deren Änderungen gegenüber den, in der Funktionsbeschreibung angegebenen Werten.

Tabelle 4 Gegenüberstellung der Parameter für die Heizkurve für Büro und Technikum, Tag und Nacht, sowie reale Werte zu den Werten der Funktionsbeschreibung

Reale Werte				
	Büro		Technikum	
Heizkurve	Tag	Nacht	Tag	Nacht
AT _{min} (°C)	-3.0	-3.0	-3.0	-3.0
AT _{max} (°C)	9.0	10.1	9.0	9.0
ST _{max} (°C)	34.3	34.3	34.3	34.3
ST _{min} (°C)	25.1	25.1	25.1	25.1
Funktionsbeschreibung				
	Büro		Technikum	
Heizkurve	Tag	Nacht	Tag	Nacht
AT _{min} (°C)	5.0	5.0	5.0	5.0
AT _{max} (°C)	15.0	15.0	15.0	15.0
ST _{max} (°C)	40.0	30.0	40.0	30.0
ST _{min} (°C)	20.0	20.0	20.0	20.0

Reduzierung der Ausschaltzeiten in Treppenhäuser mit Bewegungsmelder

Die Ausschaltzeiten wurden von 5 auf 3 Minuten reduziert.

Wasserverbrauch beim Händewaschen
Wurde teilweise umgesetzt.

Licht im Containerdorf über Schalter:
Ist gerade in der Planung und wird in naher Zukunft umgesetzt werden.

Überprüfung der Funktionsbeschreibung:
Mehrere Punkte wurden implementiert. Diese dienen in den meisten Fällen aber zum Erhalt der Anlagensicherheit, deren Schutzfunktionen oder zur besseren Verständlichkeit und Dokumentierung des Gesamtsystems. Beispielsweise konnte aber der Systemdruck auf 181 mbar gesenkt werden, wodurch Pumpenlaufzeit und Stromverbrauch gesenkt werden konnte. Darüber hinaus wurde die Kühlung in den Serverräumen so geschaltet, dass beide Kühlgeräte immer parallel laufen. Dadurch verbraucht ein Kühlgerät zwar bei genügend kühler Serverraumtemperatur unnötig mehr, da die Solltemperatur bereits erreicht ist, allerdings führt dies zu geringeren Laufzeiten und zum einhalten des Mindestdurchfluss der Grundwasserpumpe.

7.5.2 Bewertung

Die Bewertung der einzelnen Maßnahmen erweist sich als schwierig, da:

- die Geräte zusammen auf einem Gemeinschaftselektrozähler liegen (Arbeitsplatzleuchten).
- die Maßnahmen stockwerkübergreifend eingesetzt werden, wodurch es unmöglich ist den Anteil der Energieersparnis am Gesamtstromverbrauch zu ermitteln (Flurbeleuchtung, Wasserverbrauch in den Toiletten).
- sie teilweise noch nicht lange genug implementiert sind, um eine aussagekräftige Bewertung abzugeben.
- individuell an die Bedürfnisse der jeweiligen Mitarbeitenden angepasst sind, wodurch eine generalisierte Aussage erschwert wird (Arbeitsplatzleuchten, Nutzerverhalten).
- mehrere Maßnahmen zeitgleich umgesetzt wurden, die auf dem gleichen Elektrozähler gemessen werden, wodurch eine Differenzierung nicht möglich ist.

Die Umsetzung einzelner Maßnahmen erwies sich als schwierig, da:

- erst Bedienelemente beschafft werden (z.B. IR-Dongle zur Bedienung der Arbeitsplatzleuchten) und eingebaut werden mussten (z.B. Temperatursensoren in der Lüftungsanlage für eine Gesamtbilanzierung der Temperaturen)
- prioritär andere Maßnahmen zur Erhaltung des Gebäudegrundbetriebs wichtiger waren
- wegen finanzieller oder aufwändiger Umsetzung nicht sinnvoll sind (z.B. Abwärmenutzung von Serverkühlung und Prozesskälte zur Wärmepumpenvorläuferhöhung, Nutzung der Sekundärkälte der Wärmepumpe zur Serverkühlung).

8 AP8: Arbeitsplatzqualität (Testo SE & Co. KGaA)

8.1 Raumluftqualitäts- und Komfortmessungen

Das Ermitteln von Raumtemperaturen gehört zu den elementaren Aufgaben beim Monitoring eines Gebäudebetriebs und ist wesentlich für die Gewährleistung eines thermischen Komforts. Dabei werden in der Regel stationäre Sensorlösungen verwendet. Im RIZ Energie ist das ebenfalls der Fall. Hier dienen wandintegrierte Sensoren der Typennummer FF 7.8 in den Büroräumen zur Ermittlung der operativen Raumtemperatur. Andererseits existieren nicht-stationäre Sensorlösungen zur objektiven Ermittlung der thermischen Behaglichkeit.

Die zu validierende Messung fand mit einem FF 7.8 Sensors statt, der innerhalb eines Raumbedienelements in jedem Büroraum des RIZ Energie zu finden ist. Das Raumbedienelement ermöglicht es dem Anwender die Raumtemperatur durch Sollwertverschiebung an das eigene thermische Komfortempfinden anzupassen.

Bei der Auswertung der Messdaten wurden zunächst die gemessenen Tagesamplituden der Raumtemperatur berechnet und gegenübergestellt.

In Abbildung 76 erkennt man, dass das Globe-Thermometer vergleichsweise höhere Tagesamplituden misst. Dabei wird auch deutlich, dass der Bereich der Tagesamplituden des Globe-Thermometers im Vergleich sehr weit verteilt ist, mit Werten von ca. 0,2 bis zu 3,3 K. Der FF 7.8 Sensor bewegt sich hingegen in einem Bereich von 0,1 bis 1,0 K.

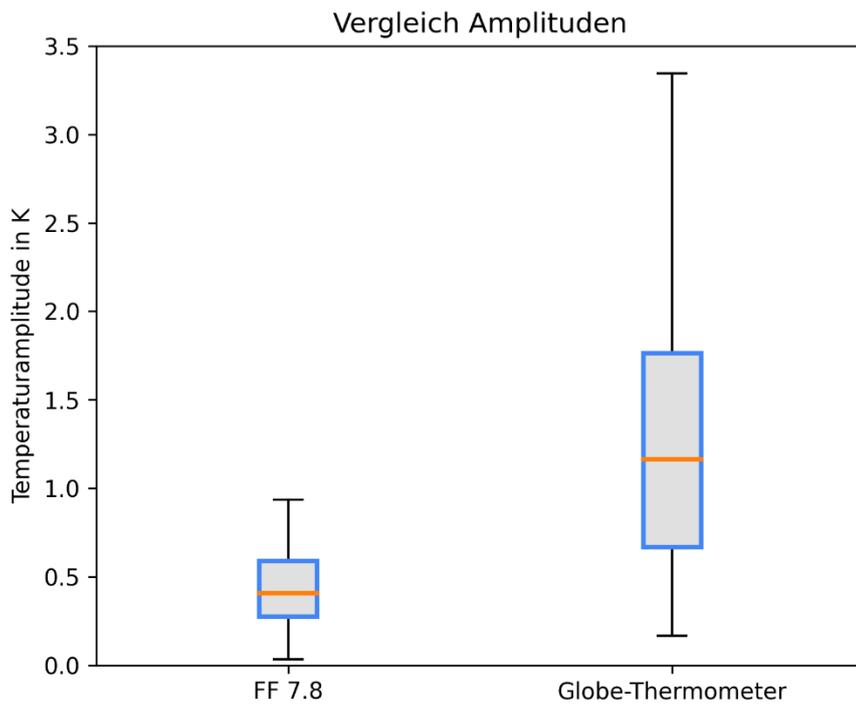


Abbildung 76: Boxplot der gemessenen Tagesamplituden der Raumtemperatur

Aus dem durchschnittlichen Tagesverlauf der beiden Sensoren in Abbildung 77 wird deutlich, inwiefern sich das Messverhalten unterscheidet. Auf den ersten Blick stellt man fest, dass die Kurve des Globe-Thermometers um ca. 1 K unterhalb der Kurve des FF 7.8 liegt. Ebenfalls ist ein zeitlicher Versatz der Tageshöchst- und Tiefstwerte zu erkennen. Das Globe-Thermometer erreicht sowohl morgens als auch abends früher den Tief- bzw. Hochpunkt. Das deutet darauf hin, dass das Globe-Thermometer schneller auf die schwankende Raumtemperatur reagiert als der FF 7.8.

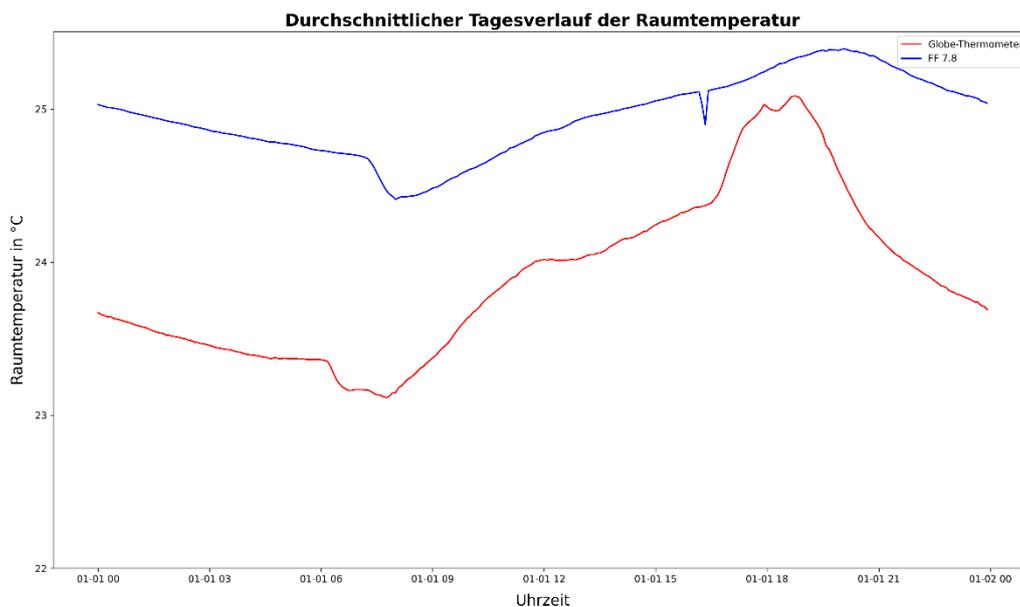


Abbildung 77: Durchschnittlicher Tagesverlauf der gemessenen Raumtemperatur

In Abbildung 78 werden nun die Tagesmediane der beiden Sensoren in einem Boxplot gegenübergestellt. Wenn man das Boxplot-Diagramm betrachtet, bestätigt sich die Beobachtung aus Abbildung 77, dass die gemessenen Temperaturen des Globe-Thermometers etwas unter den wandintegrierten Messungen liegen. Der Median der Messreihe des FF 7.8 liegt bei 24,9 °C, während der Median der Messreihe des Globe-Sensors bei 24,2 °C liegt.

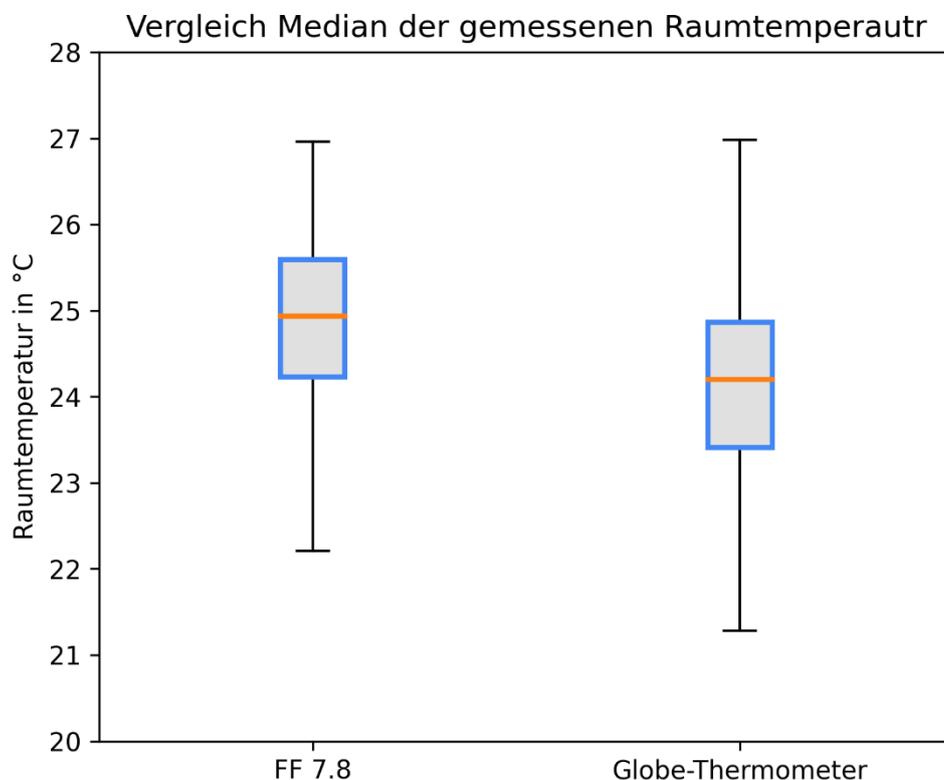


Abbildung 78: Boxplot der Tagesmediane

Nun werden noch die kumulierten Häufigkeiten der gemessenen Temperaturen in Abbildung 79 dargestellt. Hier wird der Unterschied in der Spannweite der Messwerte beider Sensoren deutlich. Die Messweite des Globe-Thermometer bewegt sich in einem Bereich von ca. 21°C bis 28 °C, während der FF 7.8 Sensor Temperaturen von ca. 22°C bis 26°C gemessen hat.

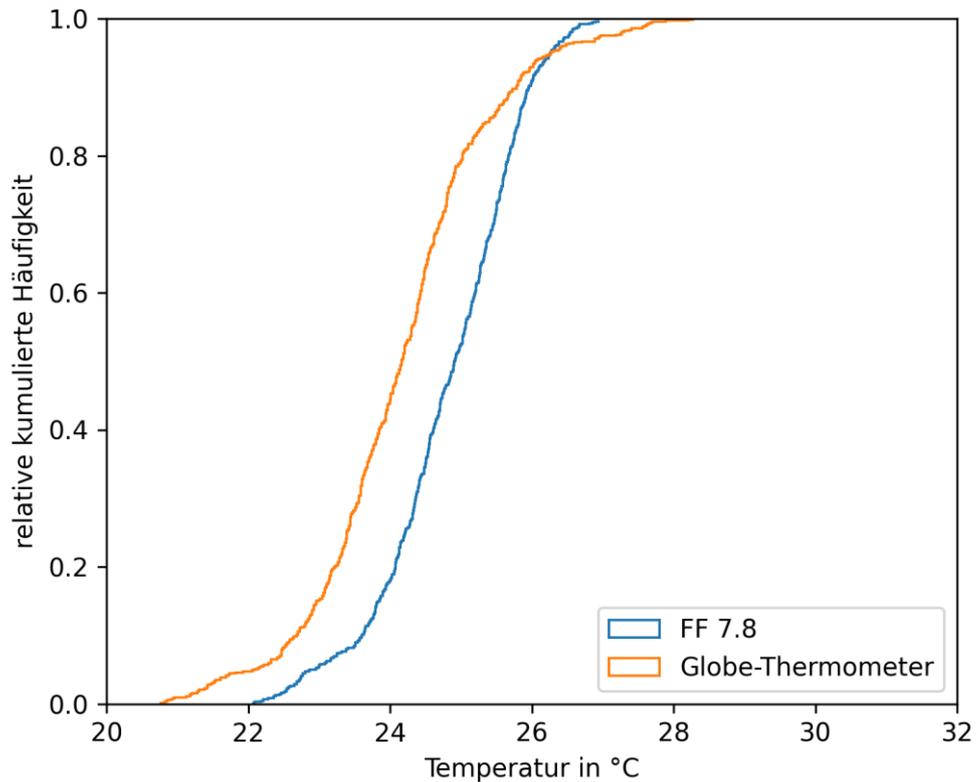


Abbildung 79: Kumulierte Häufigkeit der gemessenen Raumtemperaturen

Schlussendlich können die Messdaten verwendet werden, um nach DIN EN 15251 eine Bewertung des thermischen Komforts in Abhängigkeit der Außentemperatur abzugeben.

Bei der Komfortauswertung wird die gemessene operative Raumtemperatur dem gleitenden Mittelwert der Außentemperatur gegenübergestellt. Anschließend wird geprüft ob sich die Messpunkte innerhalb vorher definierter Komfortgrenzen befinden. In diesem Fall wurden als Grenzen für den Winterbetrieb $22^{\circ}\text{C} \pm 2 \text{ K}$ und für den Sommerbetrieb $24,5^{\circ}\text{C} \pm 1,5 \text{ K}$ gewählt. Zwischen 12°C und 18°C ist eine Übergangsphase definiert bei der die Grenzen vom Winter- zum Sommerwert hochgleiten.

In Abbildung 80 und Abbildung 81 sind die Komfortdiagramme für den FF 7.8 und den Globe-Sensor abgebildet.

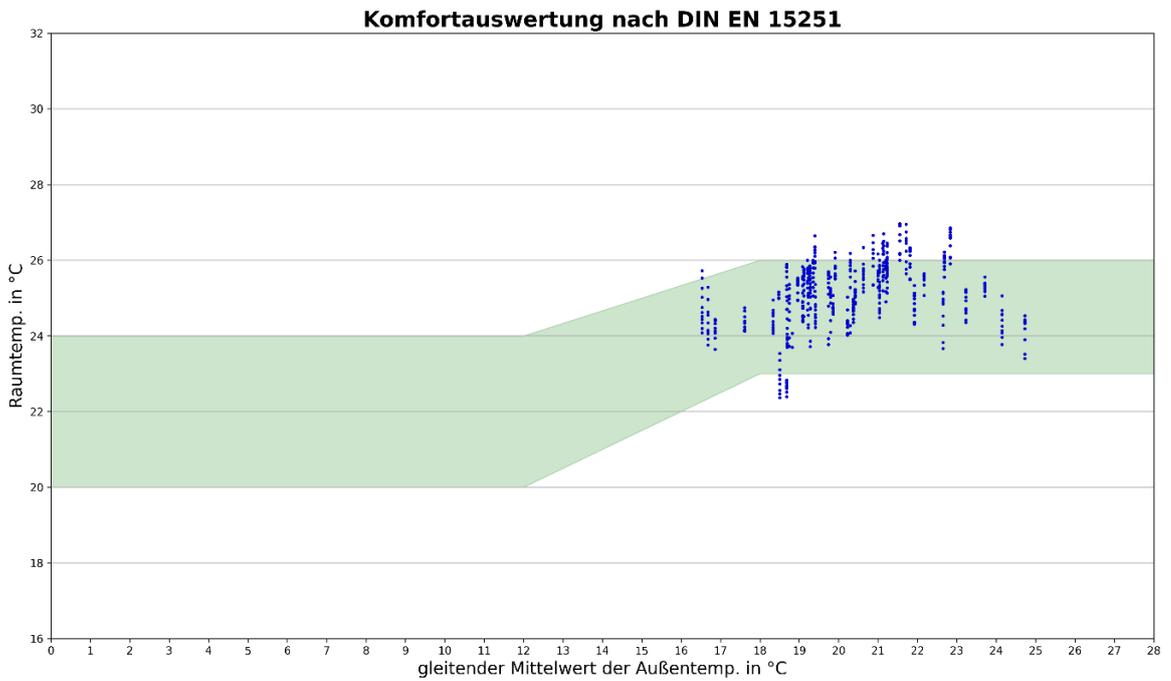


Abbildung 80: Komfortauswertung mit gemessenen Raumtemperaturen des FF 8.8

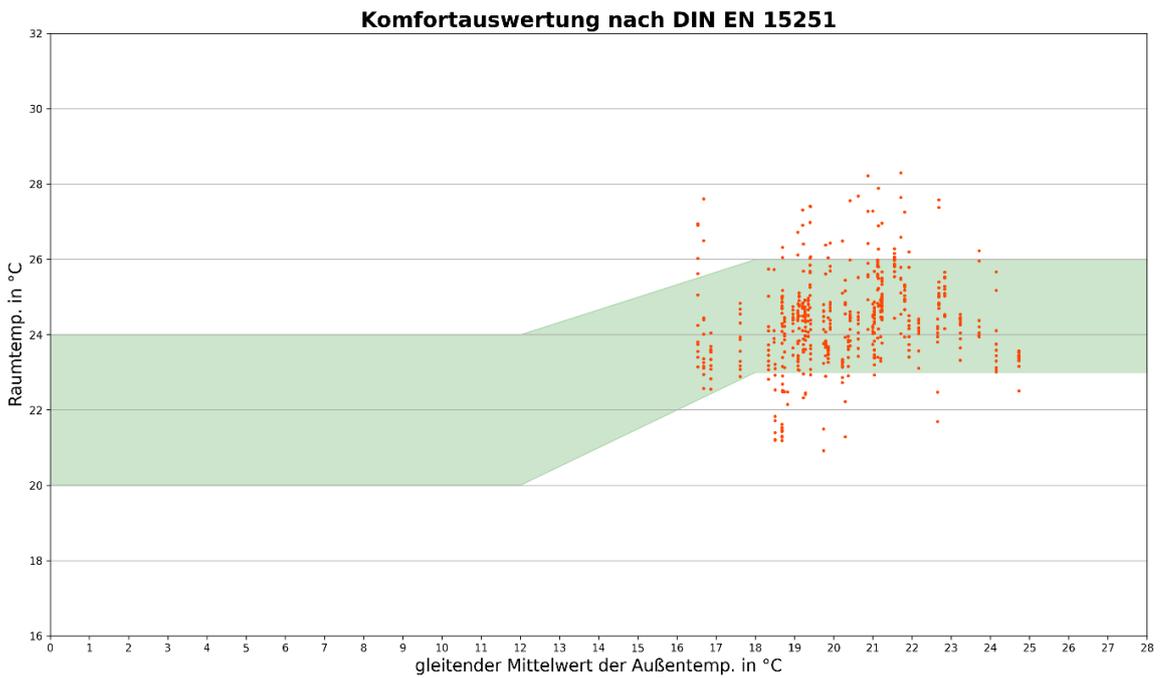


Abbildung 81: Komfortauswertung mit gemessenen Raumtemperaturen des Globe-Thermometers

8.2 Beurteilung der Arbeitsplatzqualität auf Basis neuer IAQ-Messgrößen

Bei der Beurteilung der Arbeitsplatzqualität geht es längst nicht mehr nur um die thermische Behaglichkeit. Die Luftqualität spielt eine immer größer werdende Rolle und die entsprechenden Messparameter zur Beurteilung dieser finden immer mehr Einzug in entsprechende Normen. Ein schon lange genutzter und auch weiterhin essenzieller Parameter ist die Kohlenstoffdioxid-Konzentration (CO₂). Die Auswirkungen erhöhter CO₂-Konzentrationen auf die Konzentrations- und Leistungsfähigkeit, sowie das Wohlbefinden und die Gesundheit sind gut erforscht. Zudem ist sie in Innenräumen ein guter Indikator für menschliche Präsenz und kann zur energieeffizienten Lüftungssteuerung genutzt werden, indem aus ihr der Frischluftbedarf abgeleitet wird. Zudem kann sie sowohl stationär als auch mobil sehr präzise und selektiv gemessen werden. Allerdings zeichnet sie ein sehr unvollständiges Bild von der Raumluftqualität, da weitere Verunreinigungen, wie Volatile Organische Verbindungen (Volatile Organic Compound – VOC) und Feinstaubpartikel, nicht bei der Messung erfasst werden.

Bei den VOCs handelt es sich um eine ganze Stoffklasse aus leichtflüchtigen organischen Verbindungen mit einem Siedepunkt von unter 200 – 250 °C. Diese werden z.B. vom Menschen über die Haut und die Atmung abgegeben oder gelangen beim Kochen, durch Kosmetika oder Reinigungsprodukte in die Luft. Die Quellen für VOCs sind so vielfältig wie die Stoffe selbst. Viele der Substanzen können über den Geruchssinn entweder als angenehm oder als unangenehm wahrgenommen werden, während andere völlig geruchlos sind. Problematisch ist, dass einige von diesen Substanzen besonders bei langfristiger Exposition auch schon bei geringen Konzentrationen in höchstem Maße gesundheitsschädlich sein können.

Gesundheitsschädliche Feinstaubpartikel gelangen vor allem durch industrielle Verbrennungsprozesse (Ruß) und den Straßenverkehr (Reifen- und Bremsenabrieb) in die Außenluft und über die Lüftung in den Innenraum. Üblicherweise werden die Partikel in die Klassen PM_{0.1}, PM₁, PM_{2.5} und PM₁₀ mit den jeweils mittleren Größen von 0,1, 1, 2,5 bzw. 10 µm eingeteilt. Während Partikel der Klasse PM₁₀ überwiegend im Nasen- und Rachenbereich herausgefiltert werden, können Partikel der Klasse PM_{2.5} bis in die kleinsten Lungenstrukturen vordringen. Noch kleinere Partikel können sogar in den Blutkreislauf übergehen und sich so im gesamten Körper verteilen.

Um die Raumluftqualität bei der Inbetriebnahme und dem Betrieb von Gebäuden ganzheitlich beurteilen und überwachen zu können, wurde von Testo eine modulare Plattform mit verschiedenen VOC- und Feinpartikelsensoren aufgebaut und im Projekt zur Verfügung gestellt. Diese Plattform erlaubt die schnelle Inbetriebnahme neuer Sensoren für Labortests, aber auch das Monitoring inklusive Datenlogging auf dem internen Speicher und in der Cloud im Feld. Über die Cloudanbindung wurde zudem eine Schnittstelle zur Monitoringplattform mondas IoT geschaffen. Außerdem können die mobilen Sensorknoten (Abbildung 82) auch als drahtlose Sonde mit einem softwareseitig modifizierten Multifunktionsklimamessgerät (testo 400) verwendet werden.



Abbildung 82: Modularer Sensorknoten bestehend aus einem Mikrocontroller mit Funkmodul für WLAN- oder Bluetooth-Anbindung und verschiedenen Sensoren (links), der mit einem testo 400 (rechts) ausgelesen wird

Darüber hinaus wurde untersucht, ob und wie die Messdaten der verwendeten Sensoren genutzt werden können, um einen Mehrwert bei der Beurteilung der Raumluftqualität zu generieren. Dabei offenbarten sich zunächst zwei wesentliche Schwächen der jeweiligen Messprinzipien. Sowohl die verwendeten Metalloxid-Sensoren zur VOC-Messung als auch die optischen Partikelsensoren sind nicht in der Lage zwischen verschiedenen Stoffen oder Materialien zu unterscheiden. Daher kann nicht zwischen gesundheitsschädlichen bzw. unbedenklichen Bestandteilen unterschieden werden. Die fehlende Information erschwert es zudem, mögliche Quellen zu identifizieren und ggf. zu beseitigen. Darüber hinaus sind die Metalloxid-Sensoren nicht in der Lage, eine verlässliche und reproduzierbare VOC-Gesamtkonzentration (auch tVOC) zu bestimmen. Die Sensorelemente reagieren unterschiedlich sensitiv auf verschiedene VOCs. So wird für verschiedene Zusammensetzungen selbst bei gleicher Gesamtmolekülanzahl ein unterschiedliches Messsignal erhalten. Umgekehrt kann bei einem gegebenen Messsignal nicht unterschieden werden, ob es sich um wenige Moleküle handelt, auf die der Sensor sehr sensitiv reagiert, oder viele Moleküle, auf die der Sensor nur wenig anspricht (siehe Abbildung 83).

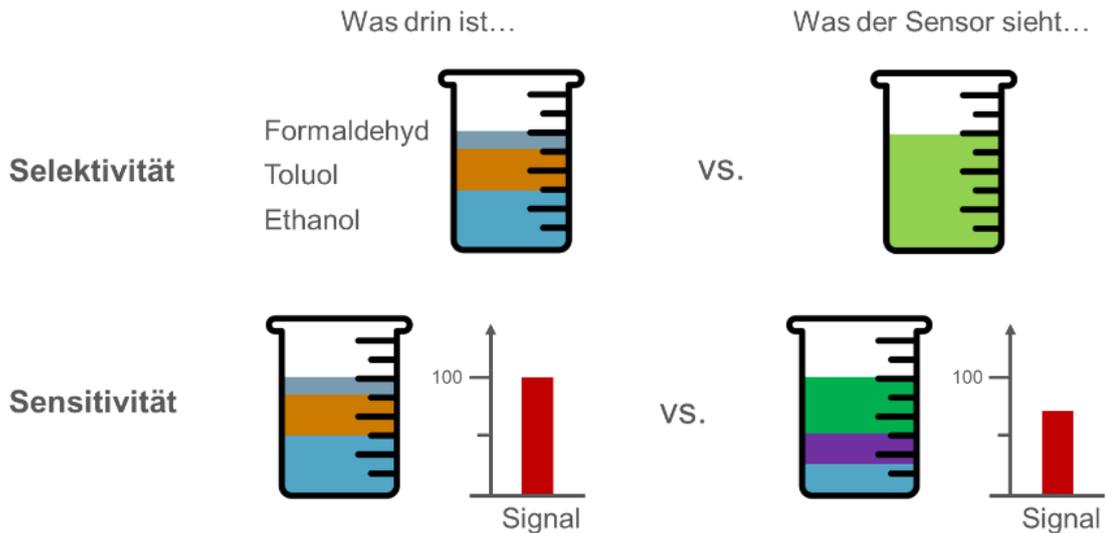


Abbildung 83: Verhalten eines (Metalloxid-) VOC-Sensors. Der Sensor ist nicht in der Lage gezielt einzelne Verbindungen zu erkennen, sondern liefert immer ein Summsignal. Zudem ist die Sensitivität für unterschiedliche Verbindungen verschieden, so dass auch bei gleicher Gesamtkonzentration unterschiedliche Signale erhalten werden können.

Die genannten Schwächen lassen sich nur mit aufwändiger, komplexer und teurer Laboranalytik lösen. Die große Stärke ist daher, dass diese Sensoren mobil und auch über längere Zeiträume zum Monitoring eingesetzt werden können. Die Messdaten müssen jedoch sinnvoll ausgegeben und richtig interpretiert werden. So geht z.B. bei den VOC-Sensoren der Trend von einer absoluten Konzentration hin zu einem Luftqualitäts- oder VOC-Index. Je nach Umsetzung zeigt dieser dann z.B. die aktuelle Luftqualität relativ zum Durchschnitt der letzten 7 Tage. Auch hier ist Vorsicht geboten, da nicht beurteilt werden kann, welche Substanzen sich in der Luft befinden und wie empfindlich der Sensor auf diese reagiert. Es können aber Zeiträume mit potenziell hoher Belastung sichtbar gemacht und das Lüftungsverhalten angepasst werden. Hier gilt es, zwischen präventiven Lüftungsmaßnahmen – ohne Wissen über das tatsächliche Gesundheitsrisiko – und dem Energieverbrauch durch die Lüftungsanlage abzuwägen.

9 AP9: Netzdienlichkeit (Maurer Energie- und Ingenieurleistungen GmbH & Co. KG)

9.1 Netzdienlicher Betrieb von Wärmepumpen durch modellprädiktive Regelung

Das RIZ Energie sollte im Rahmen des Arbeitspaket 6 innerhalb des Energienetzes der Hochschule Offenburg netzdienlich agieren. Durch das innovative Konzept des RIZ ist eine hohe Flexibilität in der Wärmeerzeugung vorhanden, was den netzdienlichen Betrieb innerhalb eines Energieverbundsystems ermöglicht. Besonders ist dabei die Wärmepumpe als großer elektrischer Verbraucher flexibel betreibbar, da im RIZ ein Pufferspeicher vorhanden ist.

Aufgrund der Komplexität der Aufgabe, wurde die Methode der modellprädiktiven Regelung gewählt. So konnten künftige Last- und Anlagenzustände prädiziert und eine optimale Regelstrategie gewählt werden. Da die Methode in der Industrie noch relativ unbekannt ist, gibt es noch wenige etablierte Methoden, um einen modellprädiktiven Regler in ein bestehendes System einzubetten. Weiterhin benötigt der Aufbau eines solchen Reglers interdisziplinäres Know-How. Im Rahmen des Projektvorhabens konnten durch die reale Umsetzung dieses Reglers sowohl Erfahrungswerte in der modellprädiktiven Regelung, als auch bei der Integrierung in bestehende Gebäudesysteme gewonnen werden. Weitere Informationen zu dieser Aufgabe sind in der entsprechenden Masterthesis [18] zu finden, die im Rahmen des Projekts entstanden ist.

9.1.1 Entwicklung des modellprädiktiven Reglers

Zur Entwicklung des modellprädiktiven Reglers war zuerst die Formulierung des Optimierungsproblems nötig, da es sich um eine optimierungsbasierte Regelstrategie handelt. Dafür soll eine Zielfunktion durch die gezielte Steuerung eines Parameters minimiert werden. In diesem Fall handelt es sich dabei um die Ein- und Ausschaltbefehle der Wärmepumpe, die genutzt werden um unter Berücksichtigung von Strommarktpreisen die Netzdienlichkeit der Wärmepumpe. Dazu wird eine Kombination von prädiktiven Modellen und Messwerten verwendet, um das zukünftige Verhalten vorherzusagen und zu optimieren.

Bei der Anwendung in Gebäudesystemen werden MPC typischerweise in geschlossenen Regelschleifen (siehe Abbildung 84) verwendet. Dabei stellt \hat{x} die Istzustände im Gebäude, d die Störgrößen (wie beispielsweise die Wetterbedingungen) und u die Stellbefehle, die von dem MPC gesteuert werden.

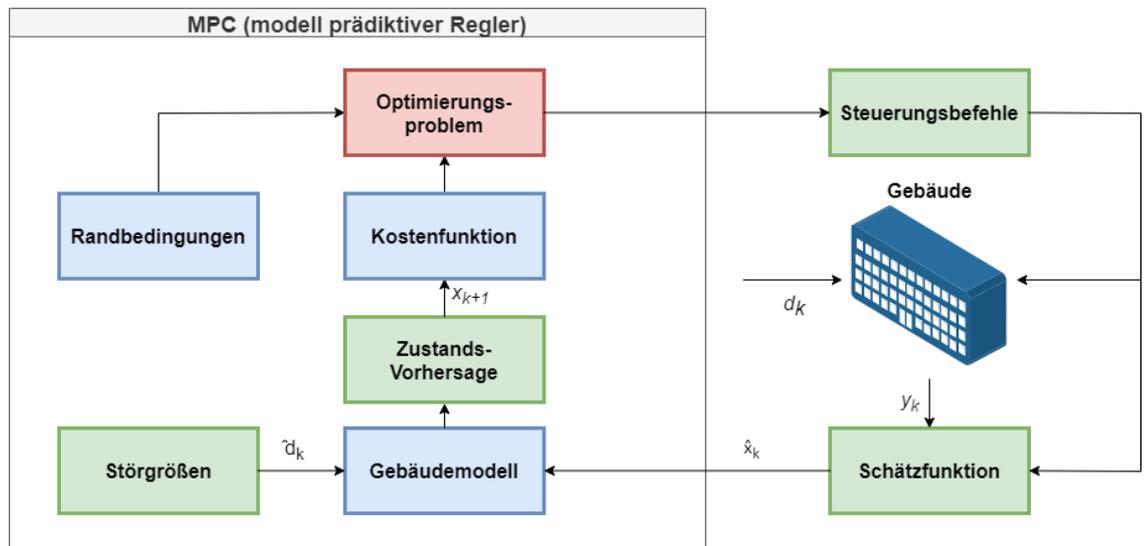


Abbildung 84: Allgemeine schematische Darstellung des Regelkreises einer MPC Regelung in einem Gebäudesystem

Für den Betrieb einer MPC Regelung sind zwei Zeithorizonte von Bedeutung: Der Prädiktionshorizont und der Steuerungshorizont. Der Prädiktionshorizont beschreibt denjenigen vollständigen Zeitintervall, für den die Modelle der MPC Regelung das Systemverhalten simulieren und vorhersagen. Der Steuerungshorizont hingegen beschreibt den Zeitintervall für den bei jeder Iteration die Entscheidungen der MPC Regelung an das reale System weitergegeben werden.

Wie Abbildung 85 zeigt, wird die Lösung des Optimierungsproblems zum Zeitpunkt t ausgeführt. Dabei werden die Systemzustände und die Steuerungseingänge für den kommenden Prädiktionshorizont prädiziert und geplant. Bei der realen Umsetzung ist die Zeitachse jedoch nicht kontinuierlich, sondern diskret und das Optimierungsproblem wird nach einem vorbestimmten diskreten Zeitschritt wiederholt gelöst. Am Ende des Steuerungshorizonts muss die modellprädiktive Regelung erneut für den gesamten Prädiktionshorizont durchgeführt werden. Diese Methode der modellprädiktiven Regelung wird Moving Horizon Prinzip genannt.

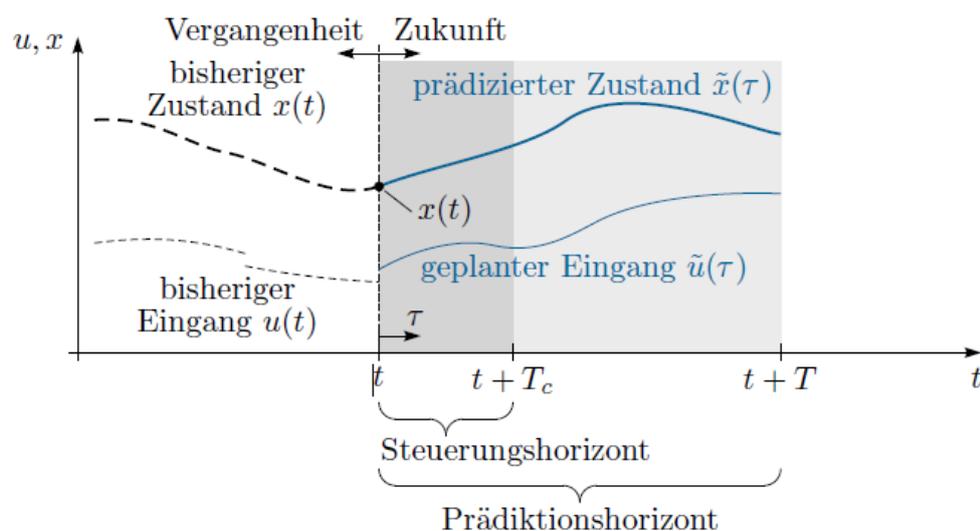


Abbildung 85: Horizonte und Signale in einer MPC Regelung [17]

9.1.2 Umsetzung in dem Heizsystem des RIZ Energie

Für die Implementierung der MPC Regelung in die GLT musste eine geeignete Maßnahme getroffen werden, um den oben beschriebenen Einschaltvorgang der Wärmepumpe, individuell steuern zu können. Dazu wurde schlussendlich eine weitere künstliche Wärmeanforderung in die GLT eingebaut, die extern von der Monitoringplattform überschrieben werden kann. Dadurch umgeht man der Problematik, dass mehrere Akteure gleichzeitig versuchen denselben Datenpunkt mit unterschiedlichen Prioritäten zu überschreiben. Stattdessen wurden zwei neue Datenpunkte erstellt, die ausschließlich von der Monitoringplattform und somit von dem Regelalgorithmus geschrieben werden.

Der resultierende Datenfluss in der GLT wird in Abbildung 86 gezeigt. Die künstliche Wärmeanforderung ist den anderen Anforderungen parallel geschaltet und kann ebenfalls ein Einschalten der Wärmepumpe bewirken. (Anmerkung: In der Abbildung ist die Wärmeanforderung des Heizregisters zur Vereinfachung nicht dargestellt). Durch das Bestehenbleiben der anderen Wärmeanforderungen wird garantiert, dass auch bei einem Ausfall des Algorithmus die Wärmepumpe weiterhin eingeschaltet wird, wenn ein Bedarf des Gebäudes besteht. Da der MPC Regler ohnehin prädiktiv agiert, sollte es in den meisten Fällen nicht dazu kommen, dass das Gebäude außerhalb des MPC Reglers eine Wärmeanforderung stellt, da der Algorithmus diese Anforderung bereits im Voraus prädiziert und den Wärmespeicher dementsprechend geladen hat.

Wird nun durch den MPC Regler eine künstliche Anforderung geschrieben wird die Signalkette, wie in Abbildung 86 abgebildet, ausgelöst. Die geforderte Temperatur wird zunächst an den Wärmespeicher gegeben, da dieser auf die entsprechende Temperatur geladen werden muss. Der Wärmespeicher kommuniziert diese Temperatur dann an die Wärmepumpe, welche die geforderte Temperatur als Solltemperatur für den Vorlauf übernimmt. Bevor die Wärmepumpe ihren Einschaltvorgang beginnt, sendet sie Einschaltsignale an die primär- und sekundärseitigen Umwälzpumpen und an den Wärmetauscher mit den dazugehörigen Ventilen. Dadurch wird der Mindestvolumenstrom gewährleistet, der für den Einschaltvorgang der Wärmepumpe benötigt wird.

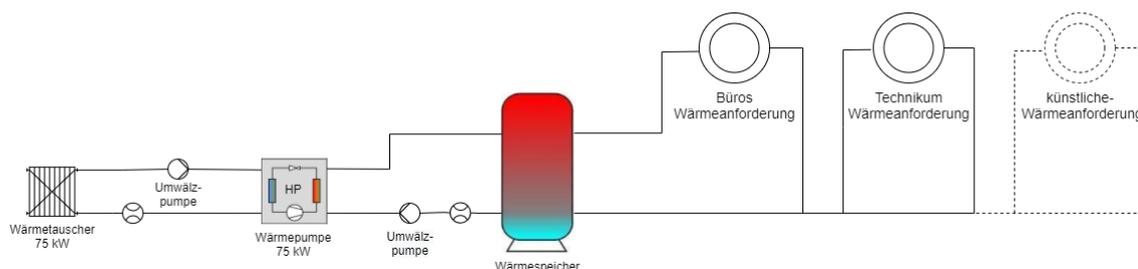


Abbildung 86: Signalfluss der Wärmeanforderung in der GLT

Durch diese Verknüpfung des MPC Reglers mit der GLT werden die bereits bestehenden Mechanismen genutzt, um alle Sicherheitsmaßnahmen zu übernehmen, während trotzdem extern auf die Schaltvorgänge der Wärmepumpe Einfluss genommen werden kann.

Der Aufbau des modellprädiktiven Reglers ist modular umgesetzt, das heißt die einzelnen Module sind in eigenen Skripten programmiert, die in übergeordneten Skripten aufgerufen werden. Das hat den Vorteil, dass einzelne Module nach und nach implementiert werden und im weiteren Entwicklungsverlauf ebenfalls leicht ausgetauscht werden konnten. Abbildung 87 zeigt den groben Aufbau und die Verknüpfung der Module miteinander.

Als Prädiktionshorizont wurden 24 Stunden angesetzt, der Steuerungshorizont bzw. der diskrete Zeitschritt entspricht 15 Minuten. Dieser Zeitschritt wurde gewählt, da er dem typischen Zeitschritt des Energiemarktes entspricht.

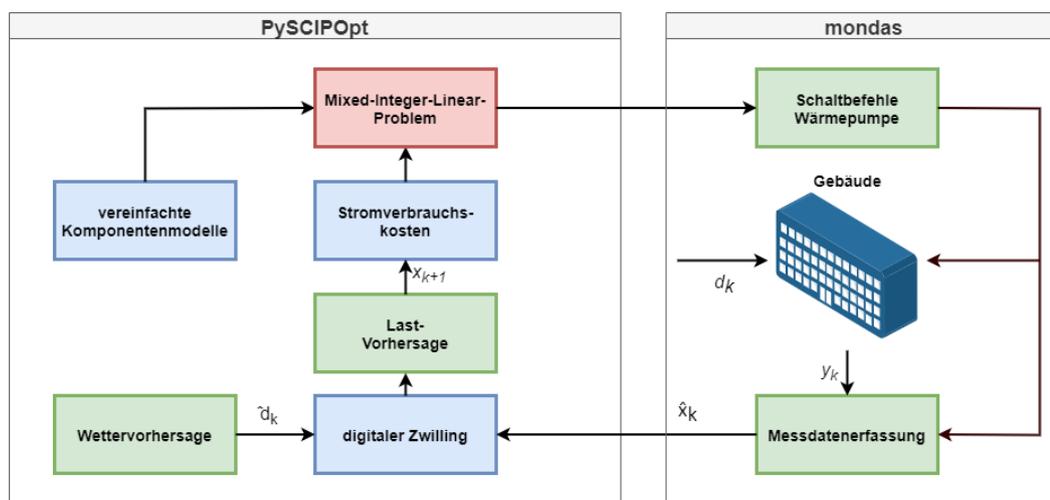


Abbildung 87: Praktische Umsetzung des modellprädiktiven Reglers

Für das Lösen von mathematischen Optimierungsproblemen gibt es unterschiedliche Optimierungssoftwareanbieter. Bei der Entwicklung dieses modellprädiktiven Reglers wurde dafür die SCIP Optimierungssoftware mit ihrer PySCIPOpt Schnittstelle für Python gewählt. Die Pythonschnittstelle ermöglicht die einfache Vernetzung des Optimierungsalgorithmus mit den verschiedenen Datenausleseschnittstellen, die für eine funktionierende modellprädiktive Regelung nötig sind.

In dem Optimierungsproblem müssen alle Gleichungen und somit alle Komponentenmodelle als Nebenbedingungen der Gleichheit oder Ungleichheit formuliert werden. Weiterhin untersagt das Verwenden von bestimmten Optimierungsalgorithmen die Formulierung von nichtlinearen Gleichungen. Dies erfordert die Vereinfachung der Komponentenmodelle an diversen Stellen, um plausible Lösungen zu finden. Im Folgenden soll näher auf diese vereinfachten Komponentenmodelle, insbesondere das Wärmepumpen- und das Wärmespeichermodell, eingegangen werden.

Wärmepumpenmodell:

Aus der Analyse der historischen Daten geht hervor, dass die Wärmepumpe in einem zwei-Stufen-Betrieb arbeitet. In der ersten Stufe erbringt sie eine Heizleistung von ca. 40 kW, in der zweiten Stufe erreicht sie ca. 80 kW. Die Messdaten zeigen deutlich, dass die Umschaltbedingung der Stufen die Betriebszeit ist. Nach 30 Minuten Betrieb schaltet die Wärmepumpe von der ersten in die zweite Stufe (siehe Abbildung 88).

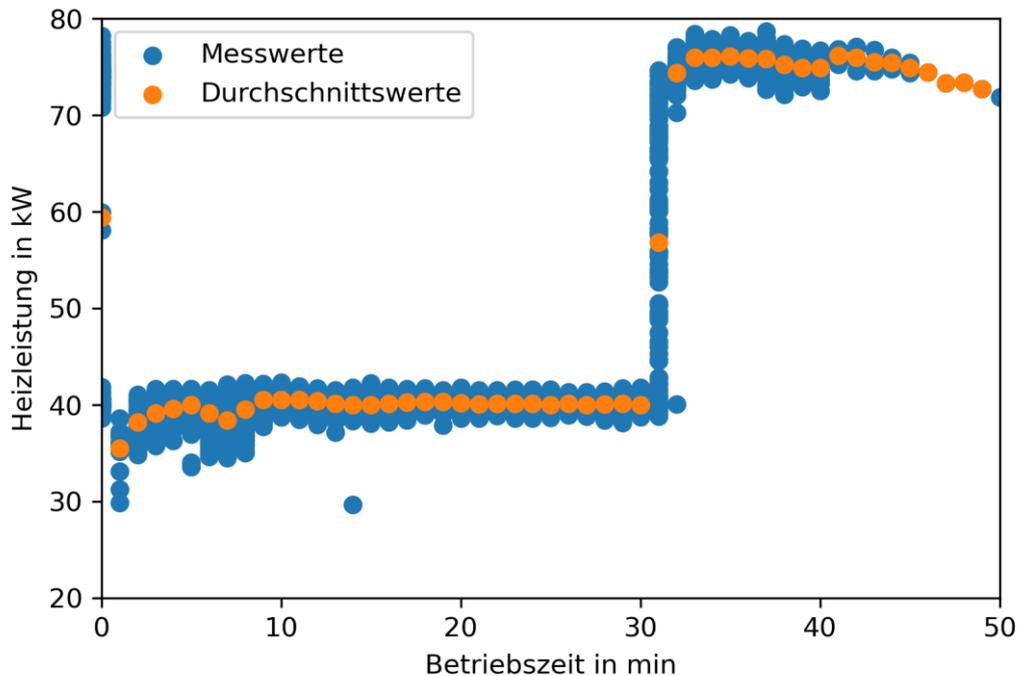


Abbildung 88: Streudiagramm der Heizleistung über die Betriebszeit der Wärmepumpe

Für die Modellierung für den MPC Regler ergibt sich somit ein Zwei-Stufen-Modell für die Heizleistung der Wärmepumpe. Die elektrische Wirkleistung wird dabei als lineare Abhängigkeit gesehen und verläuft proportional zur erbrachten Heizleistung. Daraus ergeben sich folgende Gleichungen 9.1 und 9.2 für die Heizleistung $P_{WP,th}$ und die elektrische Wirkleistung der Wärmepumpe $P_{WP,el}$, für die gilt $\delta_1 = 1$ und $\delta_2 = 0$ bei einer Betriebszeit von unter 30 Minuten und $\delta_1 = 0$ und $\delta_2 = 1$ bei einer Betriebszeit von über 30 Minuten:

$$P_{WP,th} = \delta_1 * P_{WP,Stufe1} + \delta_2 * P_{WP,Stufe2} \quad (9.1)$$

$$P_{WP,el} = 0,15 * P_{WP,th} \quad (9.2)$$

Wärmespeicher:

Der Wärmespeicher ermöglicht dem Heizsystem die nötige Flexibilität, um Tiefpreisphasen auszunutzen und die produzierte Wärme zu speichern bis ein entsprechender Wärmebedarf im Gebäude besteht. Dazu ist es wichtig die Wärmeschichtenbildung im Wärmespeicher zu berücksichtigen, die sich auf den Betrieb in Kombination mit einer Wärmepumpe auswirkt. Weiterhin sind auch die Wärmeverluste an die Umgebung zu modellieren, sodass das Verhalten des Systems sowie die Temperaturen realitätsnah präzisiert werden können.

Für Wärmespeicher gibt es bereits etablierte Modelle, die den Speicher in eine bestimmte Zahl an Schichten unterteilt und diese dann individuell und in Abhängigkeit voneinander simuliert.

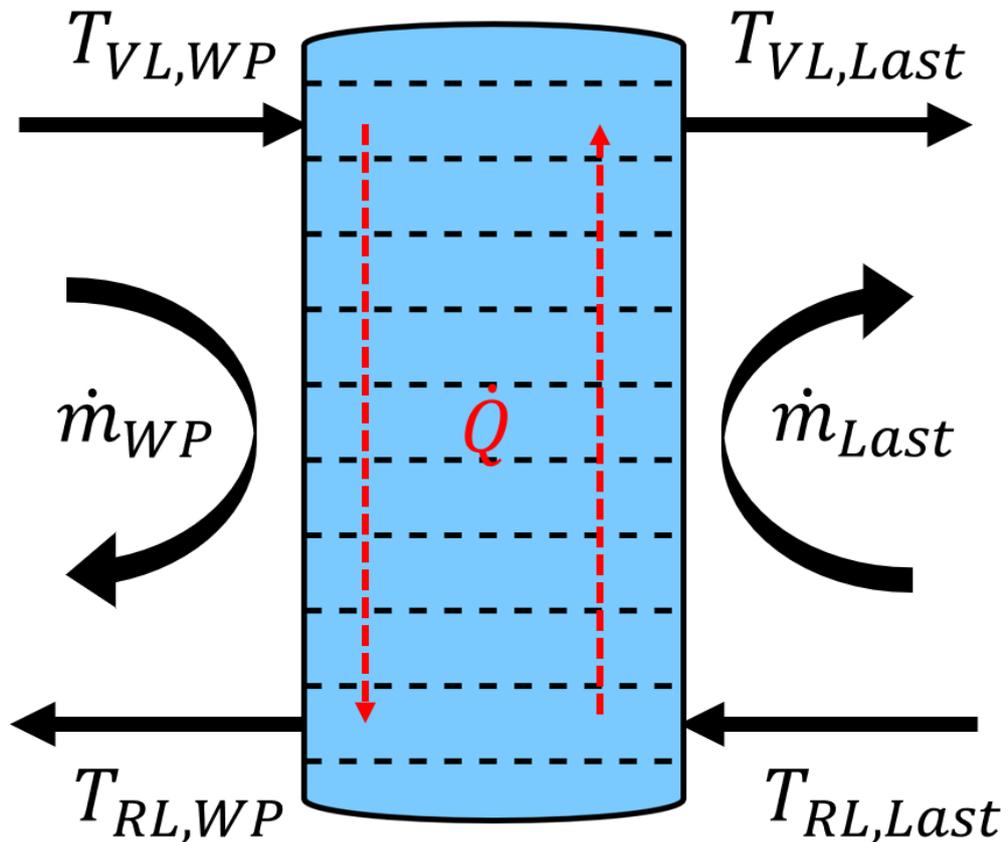


Abbildung 89: Speichermmodell basierend auf Energiebilanzen der einzelnen Schichten

Der oben beschriebene Ansatz erfordert die Formulierung von If-Else Bedingungen. Diese sind jedoch innerhalb des SCIP Optimierers, sowie bei vielen gängigen Optimierern, nicht zulässig und resultieren in Fehlermeldungen. Deshalb muss eine alternative kontinuierliche mathematische Formulierung gefunden werden. Da eine solche Formulierung und die entsprechende Umsetzung den Rahmen dieser Arbeit übersteigt, wurde für den Wärmespeicher ein vereinfachtes Modell angenommen. Statt die unterschiedlichen Schichten zu modellieren, wurde für den gesamten Speicher eine einzige Temperatur angenommen, die mithilfe einer Energiebilanz des Systems ermittelt wurde. Dafür wird verlustfrei angenommen, dass die erbrachte Heizleistung der Wärmepumpe $P_{WP,th}$ und die verbrauchte Leistung der Lastseite P_{Last} zum Zeitpunkt t , der Differenz der Energiezustände des Speichers zum Zeitpunkt $t + 1$ und t entspricht. Dazu wird die Gleichung (9.3) formuliert:

$$\begin{aligned} (T_{Speicher}(t + 1) - T_{Speicher}(t)) * V_{Speicher} * c_p * \rho_{Wasser} &= P_{WP,th}(t) + P_{Last}(t) \end{aligned} \quad (9.3)$$

Für die praktische Umsetzung des MPC Reglers muss schlussendlich eine geeignete Rechenmaschine genutzt, die den Algorithmus in regelmäßigen Zeitschritten ausführen kann. Da die Kommunikation des MPC Reglers mit dem Gebäude über die Monitoringplattform läuft, muss eine Internetverbindung gewährleistet sein. Die Verwendung der PySCIOpt Schnittstelle bringt den Vorteil, dass für die Optimierung selbst keine hohe Rechenleistung benötigt wird. Der gesamte Regelprozess von der Ermittlung der Wettervorhersage bis zum hochladen der optimalen Schaltbefehle dauert ca. 2 Minuten.

Aufgrund der beschriebenen Anforderungen wurde ein RaspberryPi als Rechenmaschine gewählt (siehe Abbildung 90). Dieser befindet sich im RIZ Energie und ist über ein Ethernetkabel mit dem lokalen Netzwerk und dem Internet verbunden. Ein Fernzugriff auf den RaspberryPi ist über einen SSH-Tunnel möglich.



Abbildung 90: Raspberry Pi im RIZ Energie

Auf dem RaspberryPi muss nun ein Skript ausgeführt werden, das entsprechend dem Steuerungshorizont des MPC Reglers, alle 15 Minuten die Python-Skripte ausführt, die den Regelkreis formen. Wie Abbildung 91 zeigt, bestehen komplexe Zusammenhänge zwischen den Skripten und den dazugehörigen externen Modulen. Dabei wird zwischen der Richtung des Datenflusses (blau) und der Richtung der Ausführung (grün) unterschieden.

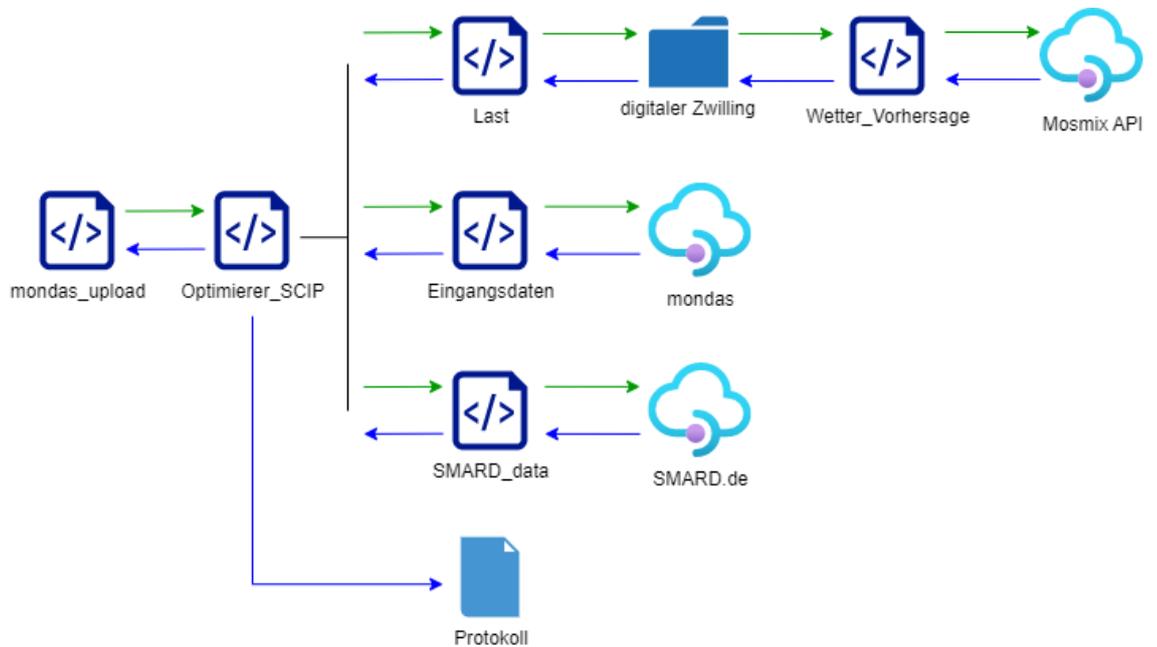


Abbildung 91: Datenfluss der Python-Skripte

Die Ausführung des gesamten MPC Regelkreises beginnt links durch das `mondas_upload` Skript. Dieses ruft zunächst das Optimierer Skript `Optimierer SCIP` auf. Der Optimierer selbst benötigt die angeforderte Last des Gebäudes, die aktuellen Messdaten des Gebäudes und die Strompreisvorhersage. Daher ruft der Optimierer drei Skripte auf.

Das erste Skript ist das `Last` Skript. Dieses ruft den digitalen Zwilling auf. In der Abbildung ist der digitale Zwilling als Ordner dargestellt, da es sich dabei um mehrere Skripte handelt, die ebenfalls in komplexen Zusammenhängen zueinanderstehen. Bevor der digitale Zwilling jedoch die Simulation starten kann, muss zuerst die Wettervorhersage ermittelt werden. Das `Wetter_Vorhersage` Skript bildet dazu die Schnittstelle. Es greift über die MOSMIX API auf die vom DWD bereitgestellten Daten zu und bereitet diese für den digitalen Zwilling auf. Nun kann der digitale Zwilling die Simulation des Gebäudebetriebs für die nächsten 24 Stunden starten. Die daraus resultierenden Daten der Nutzenergie des Gebäudes werden im `Last` Skript für den Optimierer aufbereitet und dann an das `Optimierer SCIP` weitergegeben.

Das zweite vom `Optimierer SCIP` aufgerufene Skript ist das `Eingangsdaten` Skript. Dieses verwendet Webscraping, um auf die Messdaten in der Monitoringplattform `mondas` zuzugreifen. Dazu muss lediglich ein präselektierter Datensatz heruntergeladen und die Messdaten aufbereitet werden. Diese werden dann an das `Optimierer SCIP` weitergegeben.

Zuletzt wird von dem `Optimierer SCIP` das `SMARDdata` Skript aufgerufen, das die Schnittstelle zu der `SMARD` Webplattform ist. Hier wird ebenfalls Webscraping verwendet, um die Preisvorhersage der nächsten 24 Stunden für das Marktgebiet Deutschland/Luxemburg herunterzuladen. Anschließend werden diese Daten aufbereitet und an das `Optimierer SCIP` weitergegeben.

Das `Optimierer SCIP` verfügt nun über alle benötigten Daten, um den Optimierungsprozess zu beginnen. Da die Datenaufbereitung außerhalb dieses Skriptes stattgefunden hat, kann das Skript relativ minimal gehalten werden und es werden keine überflüssigen Daten gespeichert und weiterverarbeitet. Ist der Optimierungsprozess abgeschlossen und eine optimale Lösung gefunden, wird die `Protokoll` Textdatei geöffnet.

In dieser wird protokolliert wann die Optimierung abgeschlossen wurde, ob sie eine optimale Lösung gefunden hat, wie lange die Optimierung gedauert hat, welchen Wert die Kostenfunktion erreicht hat, was die maximale angeforderte Last des Gebäudes war, was der maximale vorhergesagte Strompreis war und welcher Steuerungsbefehl für den nächsten Zeitschritt an die Wärmepumpe gesendet wurde. Diese Protokolldatei ermöglicht es auch bei langen Testläufen einen Einblick in die Prozesse des Optimierers zu erhalten.

Das Optimierer SCIP Skript plottet schließlich auch einige optimalen Variablen für den Prädiktionshorizont. Auf diese Plots kann jedoch nur zugegriffen werden, wenn das Skript direkt und nicht von einem externen Skript ausgeführt wird. Schlussendlich werden die optimalen Schaltbefehle der Wärmepumpe zusammen mit dem vorhergesagten Strompreis und dem entsprechenden Zeitstempel an das mondas_upload Skript weitergegeben.

Nun bereitet das mondas_upload Skript den Upload in die Monitoringplattform vor. Dazu werden die von dem Optimierer erhaltenen Daten mit den Sollwerten, die auf die GLT-Datenpunkte geschrieben werden sollen, in einer CSV-Datei zusammengesetzt. Die Solltemperatur der Wärmeanforderung wird, für alle Zeitschritte in denen die Wärmepumpe eingeschalten sein soll, auf 50 °C gesetzt. Die restlichen Zeitschritte wird die Solltemperatur auf 0 °C gesetzt. Analog dazu wird für den binären Sollwert der Wärmeanforderung, der Wert auf 1 gesetzt werden, wenn die Wärmepumpe eingeschalten sein soll. In den übrigen Zeitschritten wird der Sollwert auf 0 gesetzt. Über Webscrapping wird nun erneut auf die Webplattform mondas zugegriffen und die CSV-Datei hochgeladen.

Auf dem RaspberryPi muss nun ein Automatismus installiert werden, der das mondas_upload Skript automatisch ausführt. Sobald das Skript ausgeführt ist, wird die gesamte oben beschriebene Prozesskette ausgelöst und ein Iterationsschritt des Regelkreises ausgeführt.

Für die Automatisierung dieses Prozesses gibt es unterschiedliche Möglichkeiten. Für die Testläufe in dieser Arbeit wurde ein weiteres Skript verwendet, dessen einzige Aufgabe es ist, das mondas_upload Skript in einem Zeitintervall von 15 Minuten auszuführen. Dieser Automatismus bringt den Vorteil, dass er schnell installiert und ausgeführt werden konnte, sodass schnellstmöglich Messdaten für den MPC Betrieb generiert werden konnten.

10 Betriebsbegleitende Optimierung

Fehler können als ungewollte Verschlechterungen des planmäßigen Betriebs definiert werden. Im Gegensatz dazu handelt es sich bei der Optimierung um die gezielten Verbesserungen des planmäßigen Betriebs bzw. seine Anpassung an die aktuellen Randbedingungen. Optimierung im Sinne dieses Projekts benötigt ein funktionsfähiges und regelbares System und setzt daher nach der Beseitigung grundsätzlicher Fehler an. Im Rahmen der Optimierung wird die Energieeffizienz des Systems und / oder das Raumklima unter Berücksichtigung der aktuell vorliegenden Randbedingungen verbessert. Die Randbedingungen beinhalten z.B. Wetter, Komfortanforderungen oder Anwesenheit [8].

Typischerweise umfasst die Optimierung die Anpassung von Volumenströmen, Laufzeiten, Sollwerten und Freigaben. Dabei werden die tatsächliche Anwesenheit/Nutzung, die Gebäudedynamik, die Wettervorhersagen, der Teillastwirkungsgrad von z.B. Erzeugungsanlagen und die Einbindung in ein größeres Versorgungsnetz berücksichtigt.

- Optimierung der Betriebszeiten von Anlagen unter Berücksichtigung der aktuellen und evtl. zukünftigen (prädiktive Regler) Anforderungen können die Betriebszeiten von Anlagen, wie Heizung und Kühlung, oft deutlich reduzieren. Insbesondere unter Ausnutzung der trägen Speichermasse eines Gebäudes können sich hier interessante Optionen zur Energie- und Kosteneinsparung ergeben.
- Optimierung der Sollwerte z.B. von Vorlauftemperaturen der Heizung oder Kühlung. Angepasste Laufzeiten von Anlagen erfordern in der Regel eine „intelligente“ Regelung der Anlagensollwerte, damit kein Komfortverlust auftritt. Weiterhin werden z.B. Verteilverluste in Anlagen, Nutzungsgrade von Energieerzeugern oder die Effizienz von Ventilatoren maßgeblich von den eingestellten Sollwerten (Temperaturen, Volumen-, Massenströme) beeinflusst [8].

10.1 Optimierung des Betriebes von thermoaktiven Bauteilsystemen (TABS) mit simulationsgestützten und prädiktiven Steuerungsalgorithmen

Das Konzept der Thermoaktiven Bauteilsysteme (TABS) zur Heizung und Kühlung von Gebäuden gewinnt aufgrund seiner Kompatibilität mit erneuerbaren Energiequellen an Popularität. Die Steuerung von TABS und somit auch die Gewährleistung eines behaglichen Raumklimas erweist sich allerdings aufgrund der hohen Systemträgheit als komplex. Bei Nichtwohngebäuden wie dem RIZ Energie wird dieser Umstand durch die unregelmäßige Gebäudenutzung zusätzlich erschwert, da innere Wärmelasten stark variieren und nicht vorhersehbar sind.

Konventionelle TABS-Steuerungen können Störgrößen im TABS-Betrieb nur bedingt und zeitverzögert berücksichtigen, weswegen eine dauerhafte Gewährleistung des thermischen Komforts im Gebäude oft nicht erreichbar ist – dies ist auch am RIZ Energie der Fall. Als Lösung dient der Einsatz prädiktiver Steuerungsalgorithmen, die Störgrößen prognostizieren und den TABS-Betrieb dementsprechend anpassen können.

In diesem Abschnitt wird das Potenzial von intelligenten TABS-Steuerungsalgorithmen für den Einsatz am RIZ Energie anhand der Umsetzung mit einem digitalen Zwilling des Gebäudes überprüft. Dabei konnte unter Verwendung der Algorithmen und Berücksichtigung von inneren und äußeren Störgrößen im TABS-Betrieb ein verbessertes Raumklima simuliert werden. Diese Potenzialanalyse war Gegenstand einer Masterarbeit, die im Rahmen des Projektvorhabens absolviert wurde [20].

Die Ziele des optimierten TABS-Betriebes werden im Folgenden aufgelistet:

- Analyse unter Einbeziehung der Hauptstörgrößen (interne, sowie externe Wärmelasten und Wetter) auf den thermischen Komfort
- Berücksichtigung gebäudezonenspezifischer Charakteristika (Fenstergröße, Fassadenfläche...)
- Erstellung und Einbezug eines Gebäudebelegungsfaktors
- Definition und möglichst dauerhafte Einhaltung von thermischen Komfortkriterien
- Prognose gebäudezonenspezifischer Energiebedarfe eines Folgetages zur Einhaltung einer vordefinierten Raumtemperatur
- Prognose von TABS-Energiepaketen eines Folgetages zur Einhaltung einer vordefinierten Raumtemperatur
- Verknüpfung und Verbesserung von vorhandenen Gebäudesimulationsmodellen

10.1.1 Anwendung des Unknown-But-Bounded (UBB)-Verfahrens im RIZ Energie

Das Unknown-But-Bounded (UBB)-Verfahren wurde in der Schweiz entwickelt [19] und hat sich als effektiver Ansatz zur Leistungsauslegung und zur Ermittlung geeigneter Heiz- und Kühlkurven für den Betrieb von TABS bewährt. Dabei wird die Variabilität gebäudeinterner Wärmegewinne berücksichtigt, jedoch nicht in Form von bekannten und exakten Werten, sondern unbekannt und eingegrenzt zwischen minimalen und maximalen Wärmegewinnverläufen („unknown but bounded“). Im Folgenden sind die Schritte des UBB-Verfahrens nach Tödtli [19], [20] und Gwerder [21] kurz aufgelistet.

1. Definition der Gebäude- und TABS-Parameter
2. Festlegung der Wärmegewinnschranken
3. Wahl der Basisregelstrategie
4. Berechnung der äquivalenten Wärmegewinnschranken
5. Festlegung der Komfortanforderungen
6. Berechnung der TABS-Heiz- und TABS-Kühlkurven

Nachfolgend wird schrittweise die Anwendung des UBB-Verfahrens auf das RIZ Energie vorgestellt. Die relevanten TABS sind dabei die Geschosdecken des Verwaltungstraktes mit den Rohrregistern in Bauteilmittellage (BKT). Zur Umsetzung wurde der dynamische digitale Zwilling des Gebäudes genutzt und eine Simulation für ein ganzes Jahr durchgeführt. Sämtliche Rechenschritte und Formeln nach [19] bzw. [21] wurden hierfür in Python Programmcode übersetzt.

1. Definition der Gebäude- und TABS-Parameter

Im primären Schritt werden die Daten der relevanten Räume bzw. Zonen und der TABS zusammengestellt. Dazu gehören bspw. der prozentuale Fensteranteil der Fassade, der Abstand zwischen den TABS-Rohren in cm oder der thermische Widerstand zwischen Beton und Raum in $(m^2 \cdot K)/W$. Mit diesen Parametern kann ein thermisches Widerstandsnetzwerk berechnet werden, das das Verhalten der TABS eindimensional repräsentiert.

Das TABS-Modell beim UBB-Verfahren basiert auf jenem nach [22]. Auch hier wird der dreidimensionale Wärmeübergang im Bauteil mit einem thermischen Widerstandsnetzwerk auf einen eindimensionalen Ansatz reduziert, um eine Korrelation zwischen Vorlauftemperatur (ϑ_{sw}) und mittlerer Bauteiltemperatur (ϑ_c) herzustellen (siehe Abbildung 92).

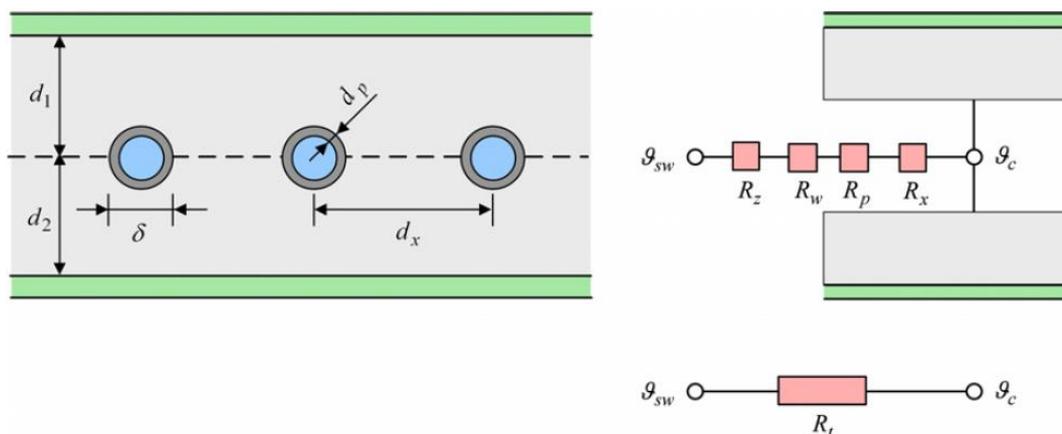


Abbildung 92 Rohregister im Bauteil (links) und entsprechende Darstellung als TABS-Modell (rechts) [21]

Über das Raummodell – ebenfalls ein stationäres Widerstandsnetzwerk – wird der Bezug zur Außentemperatur (ϑ_{oa}) hergestellt (siehe Abbildung 93). Mit dem TABS- und dem Raummodell können später die äquivalenten Wärmegewinnschranken bzw. die Heiz- und Kühlkurven ermittelt werden. Die Parameterwerte der Modelle können nach der Definition aller zonen- bzw. geschossspezifischen Gebäude- und TABS-Parameter gemäß Tabelle 5 berechnet werden. Die Daten wurden dem statischen digitalen Zwilling (BIM-Modell) sowie Bau- und Montageplänen entnommen. Die Formeln zur Berechnung der einzelnen Widerstände sind in Anhang B aufgelistet.

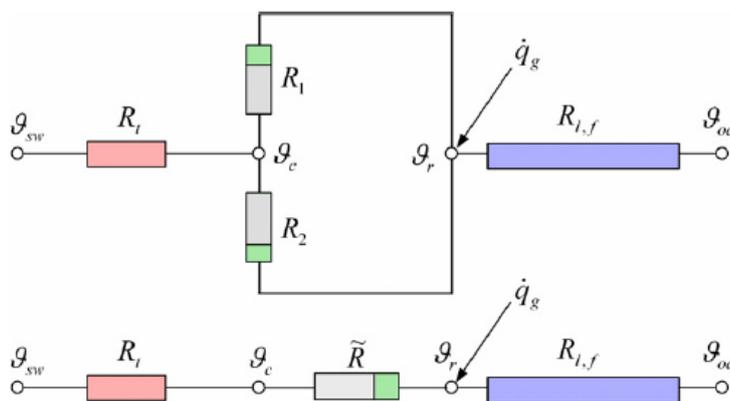


Abbildung 93 Raummodell reduziert auf ein stationäres Widerstandsnetzwerk [21]

Tabelle 5 Parameter zur Berechnung der thermischen Widerstandsnetzwerke des UBB-Verfahrens

TABS-Parameter		Gebäudeparameter (zonenspezifisch)		Fluid-/Materialparameter	
δ	Rohraußendurchmesser, m	A_{fi}	Gesamtfläche, m ²	c_a	Wärmekapazität Luft, J/kgK
d_r	Rohrwandstärke, m	A_l	Verlustfläche Fassade, m ²	c_w	Wärmekapazität Wasser, J/kgK
d_x	Rohrabstand, m	A_{ta}	TABS-Fläche, m ²	R_{cov1}	Widerstand Bodenbelag, m ² K/W
λ_p	Wärmeleitfähigkeit Rohrwandmaterial, W/mK	h_{t1}	Wärmeübergangskoeffizient Bauteil – oberer Raum, W/m ² K	R_{cov2}	Widerstand Deckenbelag, m ² K/W
λ_s	Wärmeleitfähigkeit Bauteilmaterial, W/mK	h_{t2}	Wärmeübergangskoeffizient Bauteil – unterer Raum, W/m ² K	U_l	mittlerer U-Wert Fassade (Verlustfläche), W/m ² K
d_1, d_2	Dicke des Bauteils ober-/unterhalb der Rohre, m	l	Länge einer Rohrschleife, m	ρ_a	Dichte der Raumluft, kg/m ³
\dot{m}_{sp}	spezifische Massenströmungsrate bezogen auf TABS-Fläche, kg/hm ²	V_a	Luftvolumen (Raum), m ³	n_a	(Luft-)Infiltrationskoeffizient, 1/h

2. Wahl der Basisregelstrategie

Die außentemperaturgeführte Vorlauftemperaturregelung wird als Basisregelstrategie beibehalten.

3. Spezifikation der Wärmegewinne und Wärmegewinnprofile

In diesem Schritt werden die unteren („lower bound“) und oberen Grenzen („upper bound“) für gebäudeinterne Wärmegewinne in W/m² bestimmt, die sogenannten Wärmegewinnschranken (siehe Abbildung 94). Für Bürogebäude werden diese jeweils für Arbeitstage und Nicht-Arbeitstage definiert. Hiermit werden vier Arten von Variabilität hinsichtlich der Wärmegewinne berücksichtigt:

- Unsicherheit der Kenntnis während der Planungsphase
- Nicht voraussagbare Tag-zu-Tag-Variationen
- Raum-zu-Raum-Variabilität für Räume der gleichen Zone
- Variabilität innerhalb eines Tages

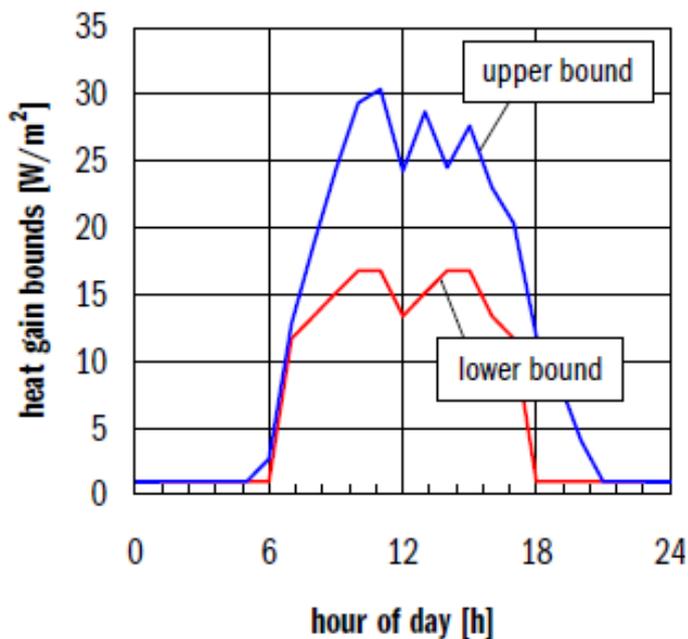


Abbildung 94 Exemplarischer Verlauf von Wärmegewinnschranken in einem Büro an Arbeitstagen [23]

Als entscheidende Störgröße des TABS-Betriebs kommt der Bestimmung der raum- bzw. zonenspezifischen Wärmegewinne, die sich aus Wärmegewinnen durch solare Einstrahlung und internen Wärmegewinnen zusammensetzen, eine signifikante Bedeutung zu. Die Wärmegewinne durch solare Einstrahlung lassen sich mit mathematischen Modellen – wie hier im digitalen Zwilling – präzise berechnen, unter der Voraussetzung, dass qualitativ hochwertige Strahlungsmessdaten vorliegen.

Die Bestimmung der internen Wärmegewinne ist komplexer, da sie mehrteilig sind und keinem definierbarem, sich wiederholendem Verlauf folgen. Nach DIN V 18599-2 [24] werden sie durch die Summe aus fünf verschiedenen Wärmequellen gebildet:

$$Q_{l,source} = Q_{l,p} + Q_{l,l} + Q_{l,fac} + Q_{l,goods} + Q_{l,h} \quad (10.1)$$

Mit:

- $Q_{l,p}$ Wärmeeintrag durch Personen in Wh/d
- $Q_{l,l}$ Wärmeeintrag durch künstliche Beleuchtung in Wh/d
- $Q_{l,fac}$ Wärmeeintrag durch Geräte und Maschinen (Arbeitshilfen) in Wh/d
- $Q_{l,goods}$ Wärmeeintrag durch in die Gebäudezone eingebrachte Güter mit Temperaturen über der Bilanz-Innentemperatur in Wh/d
- $Q_{l,h}$ Wärmeeintrag durch Heiz- und Kühlsysteme (bei überschlägiger Bilanzierung gleich null zu setzen) in Wh/d

Bei der Spezifikation der internen Wärmegewinne im Bürobereich des RIZ Energie sind nur die Wärmeeinträge durch Personen, künstliche Beleuchtung sowie Arbeitshilfen (Computer, Drucker, etc.) zu berücksichtigen. Es werden keine Güter mit erhöhter Temperatur eingebracht, dementsprechend ist $Q_{l,goods}$ gleich null zu setzen. Dasselbe wird für $Q_{l,h}$ gemäß [24] festgelegt, da hier keine exakte Bilanzierung vorgenommen wird.

Abbildung 95 zeigt die Einflussgrößen auf die Temperatur in einem mit TABS temperierten Raum. Die solaren (\dot{Q}_{Sol}) und internen Wärmegewinne ($\dot{Q}_{int,i}$) verursachen Temperaturanstiege, denen die Energieströme der TABS aus Decke und Boden ($\dot{Q}_{ua,i}$) entgegenwirken, um den thermischen Komfort im Raum einzuhalten. Weiterhin sind die Transmissionswärme (\dot{Q}_T)- und Lüftungsverluste (\dot{Q}_L) dargestellt [25].

Die internen Wärmegewinne durch künstliche Beleuchtung werden über die elektrische Bewertungsleistung nach DIN V 18599-13 festgelegt, die für Büros einen Richtwert von 7 W/m^2 vorgibt. Die Richtwerte für die Ermittlung der internen Wärmegewinne durch Personen und Arbeitshilfen in Nichtwohngebäuden werden der DIN V 18599-10 für die im Verwaltungstrakt des RIZ Energie relevanten Nutzungsarten entnommen, sie sind in Tabelle 6 aufgelistet.

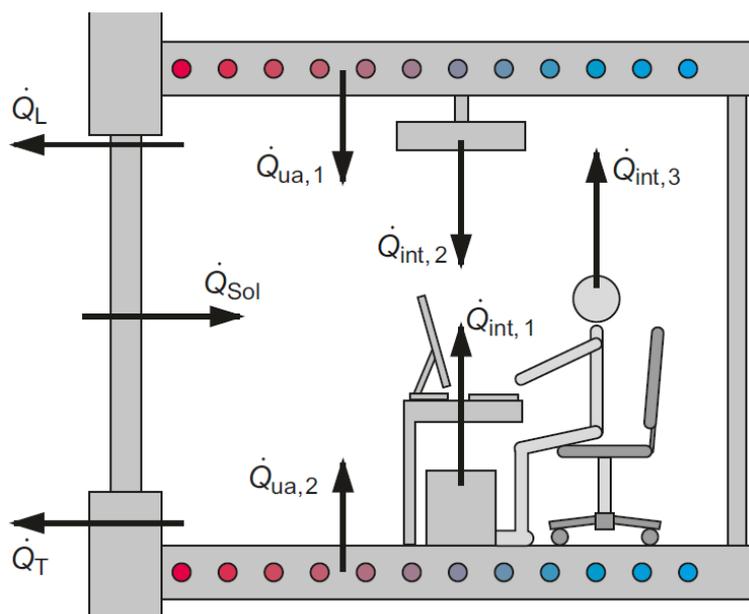


Abbildung 95 Einflussgrößen auf die Temperatur in einem mit TABS temperierten Raum [25]

Tabelle 6 Richtwerte für Wärmeeinträge durch Personen und Arbeitshilfen nach DIN V 18599-10 [24]

Nutzungen	Wärmequelle: Personen, Wh/m ² d	Wärmequelle: Arbeitshilfen, Wh/m ² d
Einzelbüro	30	43
Gruppenbüro (2 bis 6 Arbeitsplätze)	30	43
Großraumbüro (ab sieben Arbeitsplätze)	42	60
Besprechung, Seminar	93	8
Sonstige Aufenthaltsräume	93	8
Nebenflächen	0	0
Verkehrsflächen	0	0
Lager, Technik, Archiv	0	0

Anschließend werden die Richtwerte zonenspezifisch aufsummiert, je nach Aufbau der Geschossebene. Die Umwandlung von Wh/m²d (h: Stunden, d: Tag) in W/m² erfolgt durch das Dividieren des Wertes durch die 24 Tagesstunden sowie durch die Multiplikation der jeweilige Stundenanzahl des betrachteten Zeitraums.

Die relevanten Wärmeeinträge unterliegen im realen Gebäudebetrieb zeitlicher Variabilität. Wenn Raumbelungsdichte und Präsenzzeiten unbekannt sind, werden Belegungs- und Auslastungspläne erstellt, um die Nutzungscharakteristik des Gebäudes zu reproduzieren. Nach [19] werden diese Pläne auch als Gleichzeitigkeitsprofile bezeichnet. Dabei wird für die Wärmequellen stundenweise eine Auslastung zwischen 0 % und 100 % gewählt, um den Wärmeeintrag anzupassen, bspw. da ein Teil der anwesenden Personen zur Mittagszeit immer das Gebäude zur Pause verlässt und dabei die Beleuchtung sowie Computerbildschirme am betreffenden Arbeitsplatz ausschaltet. Zudem muss zwischen Arbeits- und Nichtarbeitstagen unterschieden werden.

Abbildung 96 zeigt die für das RIZ Energie gewählten Faktoren für die Belegung durch Gebäudenutzer sowie für den Einsatz von Beleuchtung und Arbeitshilfen im Laufe eines Tages. Es ist zu erkennen, dass an Nichtarbeitstagen keine Personen anwesend sind, jedoch grundlegende Operationen für den Gebäudebetrieb weiterlaufen und eine konstante Bandlast wirkt.

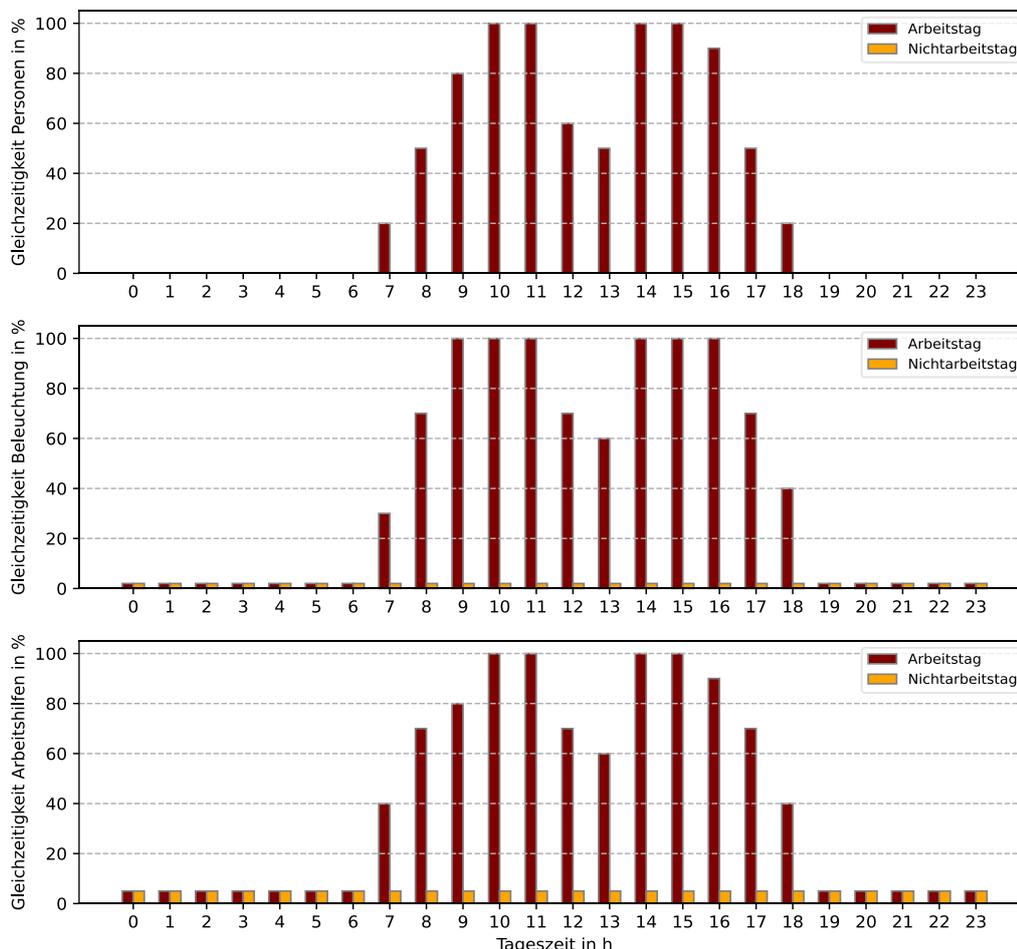


Abbildung 96 Belegungsfaktoren Gebäudenutzer (oben), Auslastungsfaktoren für Beleuchtung (Mitte) und Arbeitshilfen (unten) für das RIZ Energie

Aus der Summe der Wärmegewinne durch solare Einstrahlung, Gebäudenutzer, Beleuchtung und Arbeitshilfen sowie den Belegungs- und Auslastungsplänen kann die obere Wärmegewinnschranke erstellt werden.

Die internen, zonenspezifischen Wärmegewinne – mit den ermittelten Richtwerten aus Tabelle 6 – werden mit entsprechenden Belegungs- bzw. Auslastungsfaktoren multipliziert und aufsummiert. Dazu addiert man die Wärmegewinne zu der solaren Einstrahlung, die dem Strahlungsmodell des digitalen Zwillinges entnommen werden. Da am RIZ Energie bereits exakte Strahlungsdaten vorhanden sind, können dem UBB-Verfahren hier Wärmegewinnprofile entnommen werden.

Die untere Wärmegewinnschranke wird bei 50 % der oberen Schranke angesetzt. Dadurch werden mehrere Unsicherheiten bezüglich den Wärmegewinnen während der Hauptbetriebszeit des Gebäudes berücksichtigt: nicht vorhersehbare Tag-zu-Tag-Variationen, Raum-zu-Raum-Variabilität für Räume der gleichen Zone und Variabilität innerhalb eines Tages [19].

Abbildung 97 vergleicht exemplarisch den Verlauf der Wärmegewinnschranken im zweiten Obergeschoss des RIZ Energie an einem Arbeitstag und an einem Nichtarbeitstag.

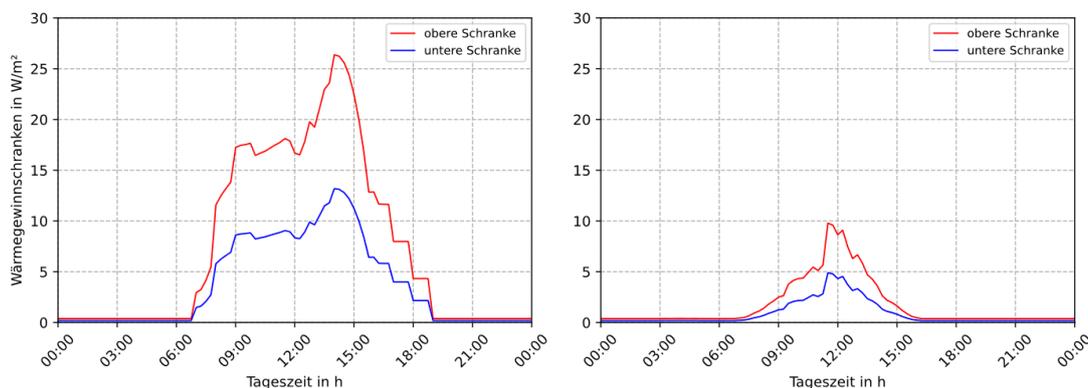


Abbildung 97 Beispielhafter Verlauf der unteren und oberen Wärmegewinnschranken im 2. Obergeschoss des RIZ Energie an einem Arbeitstag (links) und an einem Nichtarbeitstag (rechts)

4. Berechnung der äquivalenten Wärmegewinnschranken

Über ein stationäres Widerstandsnetzwerk, das mithilfe der Daten aus Schritt 1 (Definition der TABS- und Gebäudeparameter) ermittelt wurde, können die sogenannten äquivalenten Wärmegewinnschranken berechnet werden. Auch hier gibt es eine obere und untere Schranke, jedoch mit konstanten Werten. Sind die Wärmegewinne innerhalb dieser Grenzen, kann der thermische Komfort garantiert werden. Die Anforderung dafür wird im nächsten Schritt definiert.

Ausgehend von den Verläufen der Wärmegewinnschranken werden die äquivalenten, konstanten Wärmegewinnschranken ermittelt. Dieser Schritt ist erforderlich, da die Heiz- und Kühlkurven später in stationärer Form berechnet werden müssen. Wirkt die untere bzw. obere äquivalente Wärmegewinnschranke, liegt bei konstanter Außen- und Vorlautemperatur stationär die gleiche Raumtemperatur vor, welche minimal bzw. maximal auftritt, wenn periodisch der untere bzw. obere Wärmegewinnschrankenverlauf angewandt wird [19].

Für die Berechnung wird nach gemäß dem UBB-Verfahren ebenfalls ein thermisches Widerstands- und Kapazitäten-Netzwerk als Gebäudemodell verwendet, in das dynamische Verhalten der TABS berücksichtigt wird. Hier wird das 5R1C-Modells nach DIN EN ISO 17390 angewandt, da es ohnehin im dynamischen digitalen Zwilling des RIZ Energie verwendet wird. Einsatzzweck des Gebäudemodells in diesem Schritt ist die Ermittlung des Raumtemperaturverlaufs, der periodisch mit den Wärmegewinnschrankenverläufen (vgl. Abbildung 97) angeregt wird.

Dadurch ergeben sich zwei Raumtemperaturerhöhungen, eine maximale durch die obere Wärmegewinnschranke und eine minimale durch die untere Wärmegewinnschranke. In Verbindung mit den Widerständen des Raummodells (siehe Abbildung 93) wird die untere bzw. obere äquivalente Wärmegewinnschranke nach Gleichung (10.2) bzw. (10.3) berechnet. Abbildung 98 zeigt die Verläufe der Wärmegewinnschranken im 2. Obergeschoss des RIZ Energie an einem Arbeitstag mit den zugehörigen äquivalenten Wärmegewinnschranken.

$$\dot{q}_{g,elb} = \frac{R_t + \tilde{R} + R_{l,f}}{R_{l,f} \cdot (R_t + \tilde{R})} \cdot \min_i \{ \vartheta_{r,lb}(t_i) \} \quad (10.2)$$

$$\dot{q}_{g,eub} = \frac{R_t + \tilde{R} + R_{l,f}}{R_{l,f} \cdot (R_t + \tilde{R})} \cdot \max_i \{ \vartheta_{r,ub}(t_i) \} \quad (10.3)$$

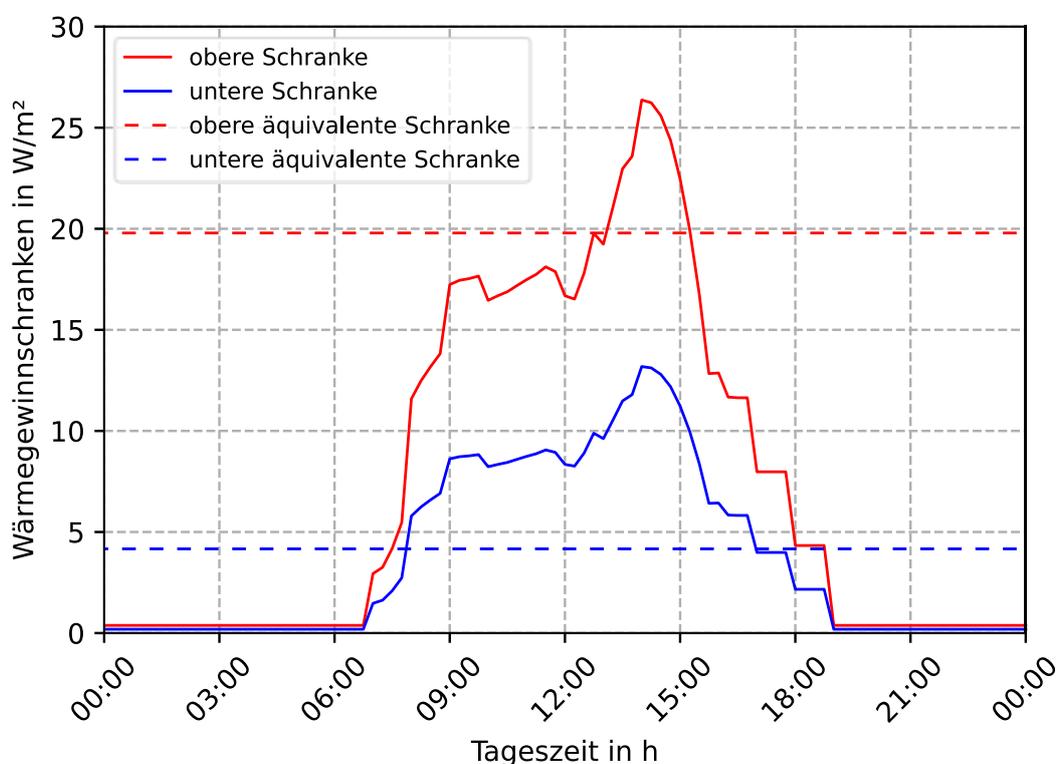


Abbildung 98 Beispielhafter Verlauf von Wärmegewinnschranken mit zugehörigen äquivalenten Wärmegewinnschranken (gestrichelte Linien) im 2. Obergeschoss des RIZ Energie an einem Arbeitstag

5. Festlegung der Komfortanforderungen

Im fünften Schritt wird ein Raumtemperaturkomfortbereich bestimmt. Hierbei können nationale oder internationale Normen herangezogen werden. In dieser Arbeit werden Raumtemperaturgrenzen nach DIN EN 15251:2012-12 verwendet.

Tabelle 7 Komfortkategorien nach DIN EN 15251 [26]

Kategorie	Operative Raumtemperatur im Winter ($T_{rm} < 10\text{ °C}$)	Operative Raumtemperatur im Sommer ($T_{rm} > 15\text{ °C}$)
I	$22,0\text{ °C} \pm 1,0\text{ °C}$	$24,5\text{ °C} \pm 1,0\text{ °C}$
II	$22,0\text{ °C} \pm 2,0\text{ °C}$	$24,5\text{ °C} \pm 1,5\text{ °C}$
III	$22,0\text{ °C} \pm 3,0\text{ °C}$	$24,5\text{ °C} \pm 2,5\text{ °C}$

6. Berechnung der Heiz- und Kühlkurven

Dieser Schritt dient der Berechnung essentieller Parameter der TABS-Regelung: die Heiz- und Kühlkurven („heating curve“, „cooling curve“) sowie die Heiz- und Kühlgrenzen (siehe Abbildung 99). Sie werden unter Verwendung der äquivalenten Wärmegewinnschranken und des Raumtemperaturkomfortbereiches ermittelt.

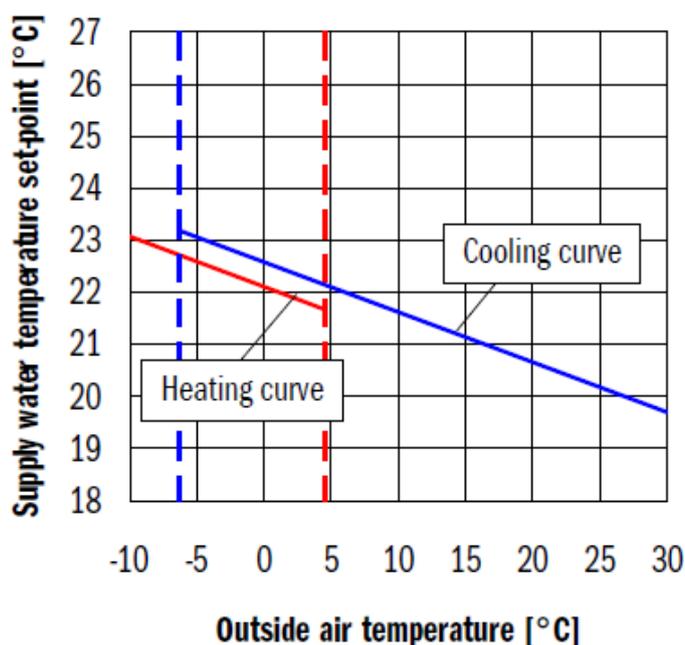


Abbildung 99 Exemplarische Heiz- und Kühlkurven sowie Heiz- und Kühlgrenzen (gestrichelte Linien) von TABS mit außentemperaturgeführter Vorlauftemperatursteuerung [23]

Zur Berechnung der Heiz- und Kühlkurven muss ein Raumtemperatur-Sollwertbereich zwischen dem Minimum $\vartheta_{r,spH}$ und dem Maximum $\vartheta_{r,spC}$ gewählt werden, der dem angestrebten Komfortgrad in den relevanten Zonen entspricht und zudem realistisch zu erreichen ist. Hierfür wird die DIN EN 15251 herangezogen und die Komfortklasse II gewählt.

Die Werte sind in Tabelle 7 aufgeführt. Dabei entspricht die untere Toleranzgrenze $\vartheta_{r,SpH}$ und die obere Toleranzgrenze $\vartheta_{r,SpC}$.

Der Sollwert für die Vorlaufwassertemperatur $\vartheta_{sw,SpH}$ der Heizkurve um $\vartheta_{r,SpH}$ unter dynamischen Bedingungen nicht zu unterschreiten, wird nach (10.4) berechnet:

$$\vartheta_{sw,SpH} = \vartheta_{r,SpH} + \frac{R_t + \tilde{R}}{R_{l,f}} \cdot (\vartheta_{r,SpH} - \vartheta_{oa}) - (R_t + \tilde{R}) \cdot \dot{q}_{g,elb} \quad (10.4)$$

Der Sollwert für die Vorlaufwassertemperatur $\vartheta_{sw,SpC}$ der Kühlkurve um $\vartheta_{r,SpC}$ unter dynamischen Bedingungen nicht zu unterschreiten, wird nach (10.5) berechnet:

$$\vartheta_{sw,SpC} = \vartheta_{r,SpC} + \frac{R_t + \tilde{R}}{R_{l,f}} \cdot (\vartheta_{r,SpC} - \vartheta_{oa}) - (R_t + \tilde{R}) \cdot \dot{q}_{g,eub} \quad (10.5)$$

Genau wie die dynamischen und äquivalenten Wärmegewinnschranken, können auch die Heiz- und Kühlkurven zonen- bzw. geschossspezifisch mit der Simulation in Python ermittelt werden (siehe Abbildung 100). Dabei werden wie auch in der realen Steuerung am RIZ Energie die gleitenden Mittelwerte der Außenlufttemperatur der letzten 24 Stunden verwendet, die aus den vorhandenen Messdaten berechnet werden. Die Kurven aus dem UBB-Verfahren liegen niedriger als die aktuell real eingesetzten und könnten somit bei realer Anwendung den hinsichtlich des thermischen Komforts zu hohen Raumtemperaturen im RIZ Energie entgegenwirken.

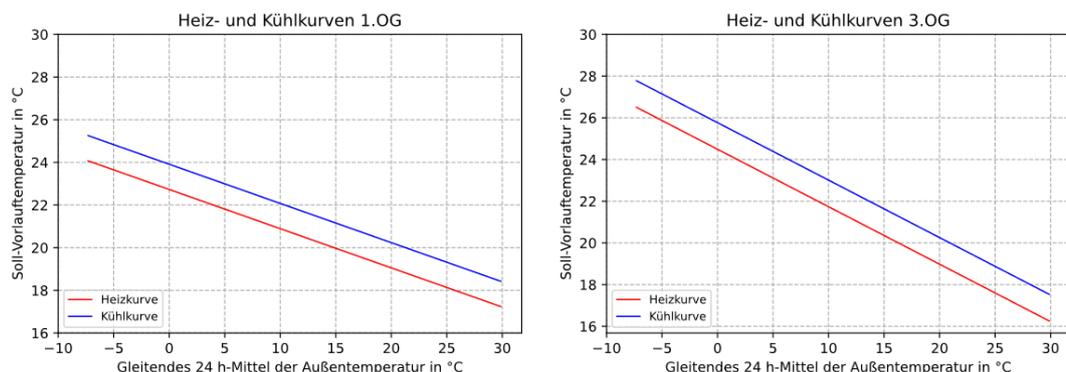


Abbildung 100 Heiz- und Kühlkurven nach der UBB-Methode für das 1. und 3. Obergeschoss im RIZ Energie

7. Implementation in den digitalen Zwilling

Um die Wirkung der mit dem UBB-Verfahren ermittelten Heiz- und Kühlkurven zu überprüfen, wurden sie in das Gebäudemodell des dynamischen digitalen Zwillings implementiert, in dem auch die außentemperaturgeführte Vorlaufwassertemperatursteuerung der BKT virtuell realisiert ist. Es wurde das neue, modifizierte 5R1C-Modell nach DIN EN ISO 13790 eingesetzt und ein Simulationslauf für das Jahr 2022 durchgeführt, um das ganzjährige Verhalten abbilden zu können. Abbildung 102 zeigt am Beispiel des zweiten und dritten Obergeschosses, dass unter Verwendung der neuen Heiz- und Kühlkurven ein deutlich niedrigerer und stabilerer simulierter Raumtemperaturverlauf erzielt wird – einerseits im Vergleich zum Verlauf der gemessenen Raumtemperaturen und andererseits im Vergleich zum Verlauf der simulierten Raumtemperaturen aus der ursprünglichen Simulation (siehe hierzu Abbildung 101).

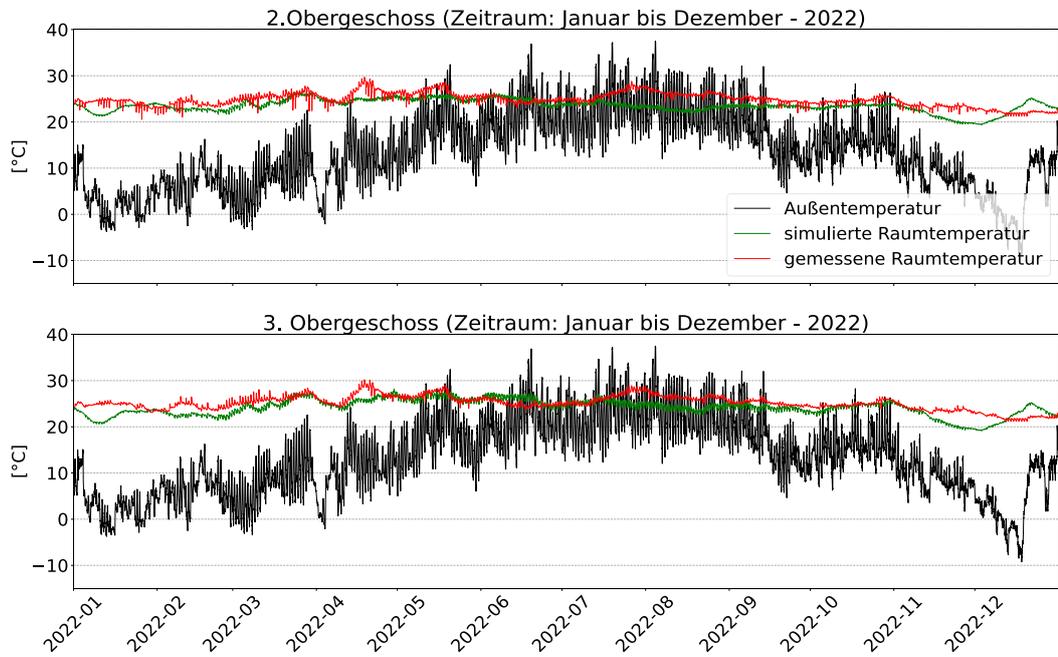


Abbildung 101 Vergleich der simulierten und gemessenen Raumtemperaturen im 2. und 3. Obergeschoss des RIZ Energie im Jahr 2022

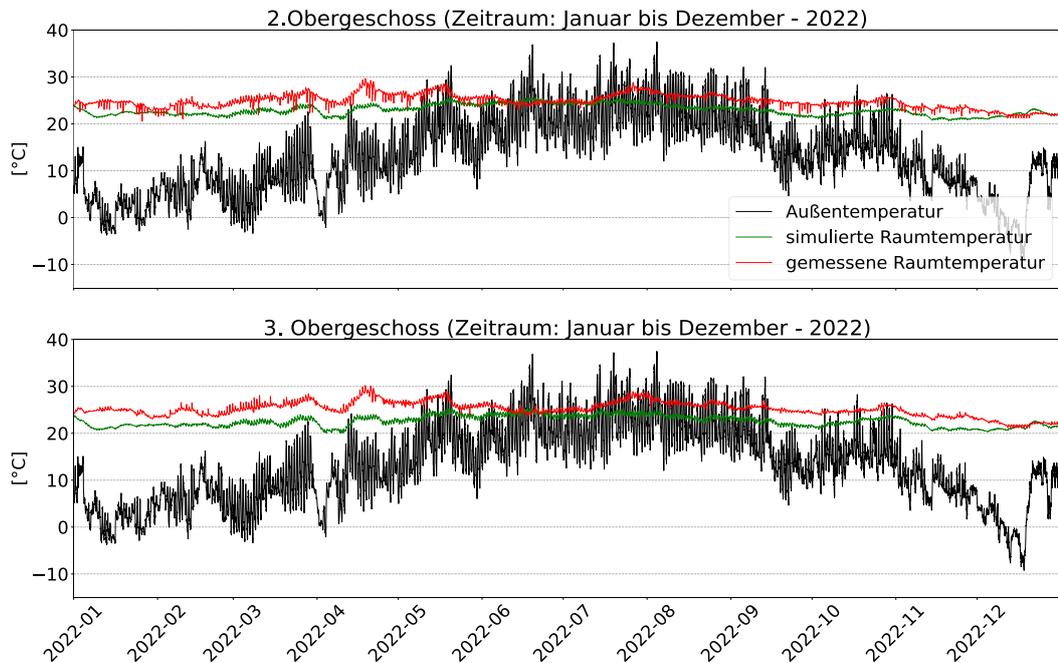


Abbildung 102 Vergleich der nach dem UBB-Verfahren simulierten und der gemessenen Raumtemperatur im 2. und 3. Obergeschoss des RIZ Energie im Jahr 2022

Anschließend wurde erneut eine Analyse des thermischen Komforts im Bürobereich für das Jahr 2022 nach der DIN EN 15251 vorgenommen, hier mit den simulierten Raumtemperaturen unter Verwendung des UBB-Verfahrens. Auch hier wurden nur Arbeitstage jeweils von 8 Uhr bis 18 Uhr einbezogen.

In Abbildung 103 ist zu erkennen, dass mit dem Einsatz der neuen Heiz- und Kühlkurven dauerhaft ein hoher thermischer Komfort in allen Geschossen des Bürobereichs erzielt werden kann. Die Komfortklasse III der DIN EN 15251 mit den höchsten Toleranzgrenzen wird nur vereinzelt und minimal verletzt. Weiterhin kann beobachtet werden, dass häufig die Komfortklasse I eingehalten wird.

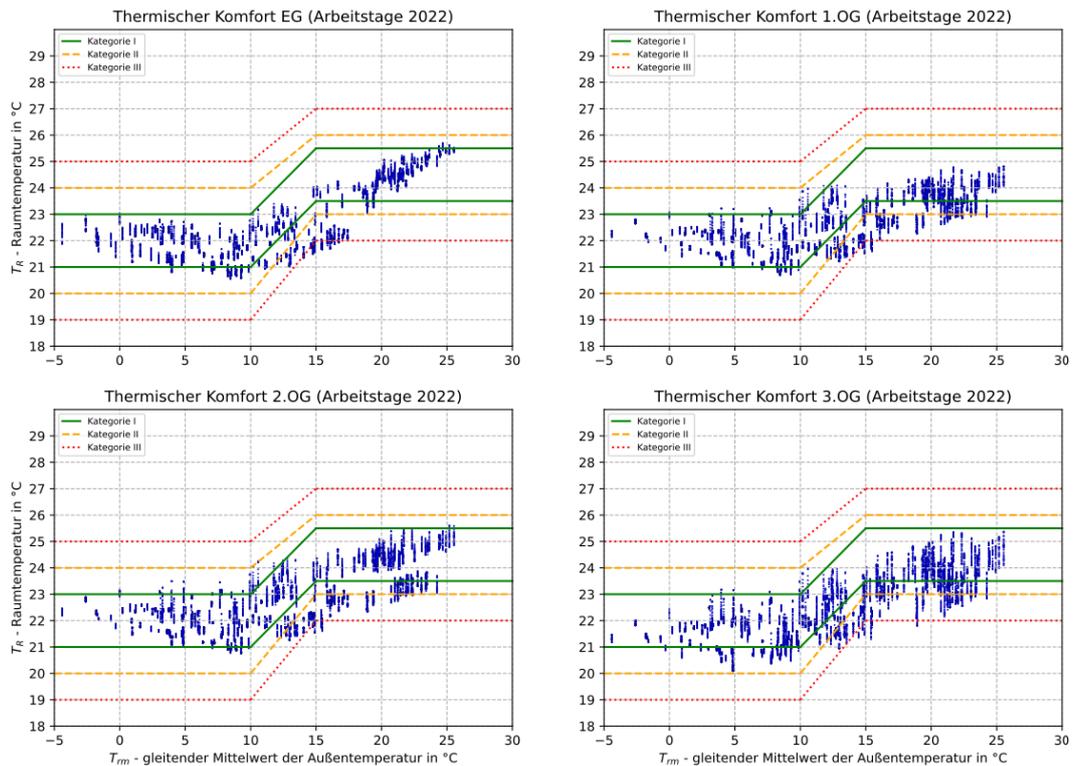


Abbildung 103 Simulierte Raumtemperaturen nach dem UBB-Verfahren an Arbeitstagen im Jahr 2022 (8 Uhr bis 18 Uhr) im Verwaltungstrakt des RIZ Energie über den gleitenden Mittelwert der Außentemperatur gemäß DIN EN 15251 [26]

Ausführlichere Informationen zu diesem Thema sind auf der Projektwebsite unter dem folgenden Link zu finden (<https://build-digitized.hs-offenburg.de/ergebnisse>)

10.1.2 Prädiktive TABS-Steuerung im RIZ Energie mit multipler linearer Regression (MLR)

In diesem Kapitel wird die Anwendung eines MLR-Algorithmus zur Lastvorhersage für die BKT-Systeme im Bürobereich des RIZ Energie im dynamischen digitalen Zwilling vorgestellt. Als Entwicklungsbasis dienten die Methoden und Ansätze von Schmelas und Bollin aus [27] und [28]

1. Struktur der TABS-Lastvorhersage

Ziel des MLR-Algorithmus ist es, ein zonenspezifisches Energiepaket in kWh für den jeweiligen Folgetag zu prognostizieren, das an die TABS geliefert werden muss, um die Einhaltung eines gewünschten Raumtemperaturwertes während dem Folgetag zu gewährleisten. Zunächst wird der zonenspezifische Energiebedarf – ebenfalls in kWh – mittels MLR ermittelt und dabei der Einfluss von Außentemperatur und Globalstrahlung einbezogen. Zur Bestimmung der Regressionskoeffizienten wird das Modell mit Messdaten des RIZ Energie eines kompletten Jahres trainiert. Diese Regressionsgleichung kann anschließend für die Lastvorhersage genutzt werden, indem anstelle von historischen Daten Wetterprognosen zu Außentemperatur und Globalstrahlung eingesetzt werden. Letztere werden über eine Programmierschnittstelle (API, engl.: Application Programming Interface) in den MLR-Algorithmus eingespeist. Die Gesamtstruktur ist schematisch in Abbildung 104 dargestellt.

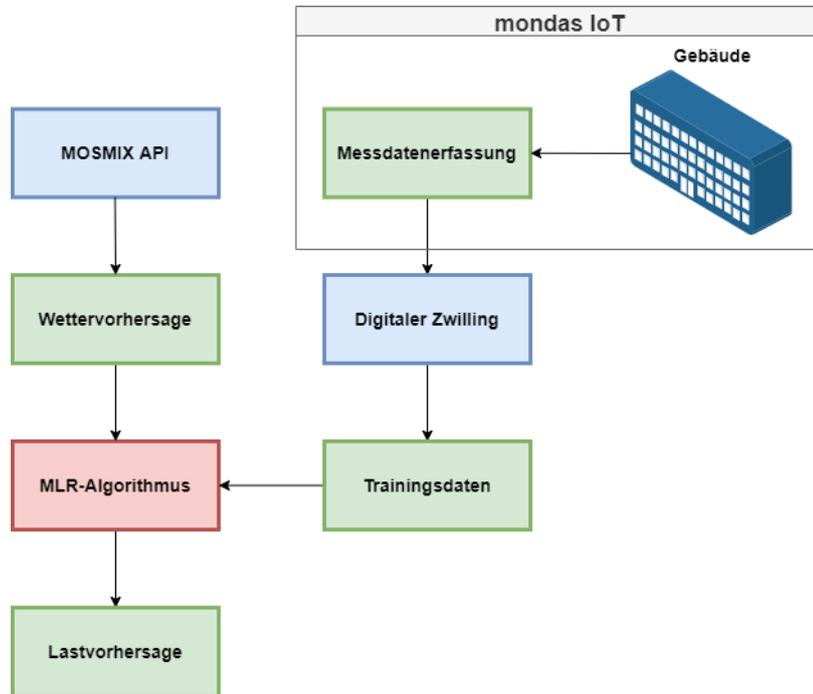


Abbildung 104 Modellstruktur der TABS-Lastvorhersage mit MLR am RIZ Energie

2. MLR-Algorithmus

Um zonenspezifisch Lastvorhersagen für die BKT erstellen zu können, werden zunächst die Regressionsgleichungen ermittelt. Dazu wird die allgemeine Form der MLR aus Gleichung (10.6) in Gleichung (10.7) überführt. Sie beschreibt die zentralen Einflüsse auf einen täglichen Energiebedarf Q_{MLR} , der notwendig ist, um eine Durchschnittsraumtemperatur \bar{T}_R beizubehalten: die durchschnittliche tägliche Außenlufttemperatur \bar{T}_{amb} und die durchschnittliche tägliche Globalstrahlung \bar{I}_{glob} .

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \dots + \beta_p X_p + \varepsilon \quad (10.6)$$

$$Q_{MLR} = a + b \cdot (\bar{T}_R - \bar{T}_{amb}) + c \cdot \bar{I}_{glob} \quad (10.7)$$

Mithilfe von Messdaten des gesamten Jahres 2022 aus dem dynamischen digitalen Zwilling wird für jede Zone bzw. jedes Geschoss eine Regressionsgleichung ermittelt. Abbildung 105 zeigt beispielhaft die Regressionsebene des 2. Obergeschosses. Die Regressionskoeffizienten a , b und c werden mithilfe der Kleinstquadratmethode (engl. Ordinary Least Squares, OLS) bestimmt. In der Programmierung in Python wird hierfür ein Regressionsmodell der Bibliothek sklearn verwendet. Der Energiefluss von den BKT-Systemen an den Raum wird dabei über 24 Stunden gemäß Gleichung (10.8) zu einer Energiemenge integriert.

$$Q = \int_{\tau_0}^{\tau_1} \dot{Q}(\tau) d\tau \quad (10.8)$$

Die Durchschnittswerte werden ebenfalls über die Dauer von 24 Stunden nach der allgemeinen Formel der Mittelwertbildung (10.9) berechnet:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (10.9)$$

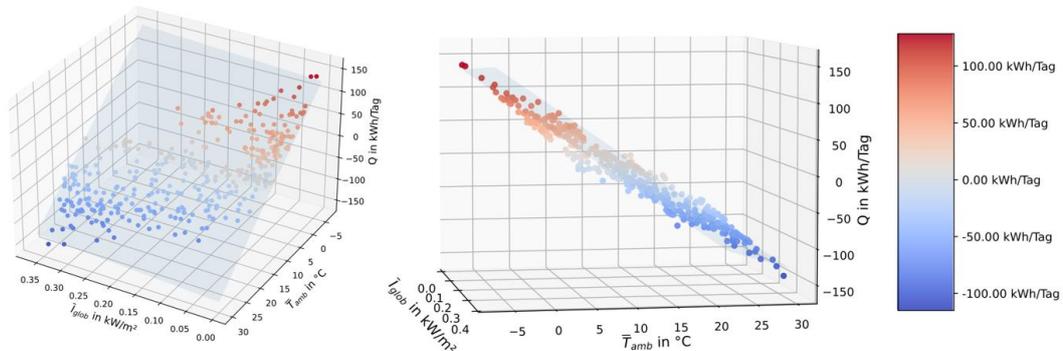


Abbildung 105 Regressionsebene für das 2. Obergeschoss im RIZ Energie in Abhängigkeit der mittleren Außentemperatur und der mittleren globalen Einstrahlung

Mit den bekannten Regressionskoeffizienten sowie Wettervorhersagen für die durchschnittliche Außentemperatur $\bar{T}_{amb,p}$ und die durchschnittliche Globalstrahlung $\bar{I}_{glob,p}$ des nächsten Tages kann mit (10.10) der Energiebedarf $Q_{MLR,p}$ einer Zone für den kommenden Tag prognostiziert werden, um eine vordefinierte durchschnittliche Raumtemperatur $\bar{T}_{R,Set}$ einzuhalten. Ein negativer Wert bedeutet hier, dass am Folgetag Heizenergie benötigt wird. Bei einem positiven Wert hat die Zone einen Bedarf an Kühlenergie.

$$Q_{MLR,p} = a + b \cdot (\bar{T}_{R,Set} - \bar{T}_{amb,p}) + c \cdot \bar{I}_{glob,p} \quad (10.10)$$

Durch die Division von $Q_{MLR,p}$ durch das Produkt aus der aktivierten TABS- bzw. BKT-Fläche und dem Zeitraum über 24 Stunden wird der durchschnittliche spezifische Wärmestrom \bar{q}_{MLR} einer Zone in W/m^2 ermittelt (10.11):

$$\bar{q}_{MLR} = \frac{Q_{MLR,p}}{A_{TABS} \cdot 24 h} \quad (10.11)$$

Die mittlere Abschaltdeckentemperatur $\bar{T}_{m,off}$ (die aktivierten Bauteile sind die Geschossdecken aus Beton) ist die Temperatur, die erreicht werden muss, um die Wärmelasten der BKT abzuleiten. Bei der Berechnung gemäß (10.12) werden die Speichereigenschaften der Decke miteinbezogen: der thermische Widerstand R , die Bauteildicke d , die Bauteildichte φ und die spezifische Wärmekapazität c_s . Der letzte Term der Gleichung beschreibt die Hälfte des Anstiegs der Temperaturerhöhung der Decke bedingt durch den durchschnittlichen Wärmestrom \bar{q}_{MLR} der Zone während eines Tages. Um diesen Wert muss die Decke unterkühlt werden.

$$\bar{T}_{m,off} = \bar{T}_{R,Set} - \bar{q}_{MLR} \cdot \left(R + 0,5 \cdot 24 h \cdot \frac{1}{d\varphi c_s} \right) \quad (10.12)$$

Das für einen Folgetag prognostizierte Energiepaket einer Zone $Q_{TABS,p}$ wird mit Gleichung (10.13) beschrieben. Um den aktuellen Ladezustand der Decke zu berücksichtigen, wird die Differenz zwischen $\bar{T}_{m,off}$ und der mittleren Deckentemperatur zum Zeitpunkt der Berechnung $\bar{T}_m(\tau)$ gebildet. Diese wird mit den Speichereigenschaften der Decke $d\varphi c_s$ und der aktivierten BKT-Fläche A_{TABS} multipliziert.

$$Q_{TABS,p} = d\varphi c_s \left(\bar{T}_{m,off} - \bar{T}_m(\tau) \right) \cdot A_{TABS} \quad (10.13)$$

$Q_{TABS,p}$ muss der BKT innerhalb des nächsten Tages zugeführt werden. Dabei signalisiert ein positiver Wert Heizbetrieb, während ein negatives Energiepaket Kühlbetrieb bedeutet.

3. Historische Messdaten

Die Messdaten zum Training des MLR-Algorithmus werden von der GLT über die Webplattform „mondas IoT“ mittels Webscraping (Abruf von Webseiten und anschließende Extraktion relevanter Daten) – ausgeführt in Python – im CSV-Dateiformat auf den lokalen Rechner des Benutzers transferiert. Nach der Datenaufbereitung in Python werden die Daten in das Messdatenauslese-Skript des dynamischen digitalen Zwillinges eingelesen, das nur zu diesem Zweck existiert. Von diesem Skript aus können die Messdaten bedarfsgerecht in alle anderen Modelle des digitalen Zwillinges importiert werden.

Der MLR-Algorithmus wurde in das Gebäudemodell integriert, da hier auch die BKT modelliert wird. Als Trainingsdaten erhält der Algorithmus die Messdaten zur Heiz- bzw. Kühlenergie der BKT, sowie zur Außenlufttemperatur und Globalstrahlung im Jahr 2022. Die Wettermetadaten werden über die Wetterstation der Hochschule Offenburg bereitgestellt.

4. Wetterprognosedaten

Zur Lastvorhersage mit dem MLR-Algorithmus werden Wetterprognosen benötigt. Diese können mithilfe des Python API „wetterdienst“ [29] direkt in Programmierskripte – hier das Gebäudemodell des digitalen Zwillinges – implementiert werden. Die API ruft dabei Wettervorhersagen des Deutschen Wetterdienstes (DWD) ab, die mit dem MOSMIX (Model Output Statistics Mix)-Verfahren jeweils für die nächsten zehn Tage berechnet werden.

Die Daten werden vor der Implementation in den MLR-Algorithmus in Python aufbereitet. Dabei werden Einheiten umgerechnet – K in °C für die Außenlufttemperatur und kJ/m² in kW/m² für die Globalstrahlung, sowie das Tagesmittel der Prognosedaten erstellt. Dadurch sind die Daten bereit um direkt Energiebedarfe nach Gleichung (10.10) berechnen zu können.

5. Simulationsergebnisse

Im Folgenden wird beispielhaft die Lastvorhersage im zweiten Obergeschoss des RIZ Energie für den 22.02.2023 – durchgeführt am 21.02.2023 – gezeigt. Aus dem MLR-Modell für das zweite Obergeschoss ergeben sich die nachstehenden Regressionskoeffizienten:

$$a = 26,871 \text{ kWh}$$

$$b = -1,877 \frac{\text{kWh}}{^\circ\text{C}}$$

$$c = -34,606 \text{ m}^2 \cdot \text{h}$$

Mit einer prognostizierten mittleren Außentemperatur von 7,7 °C und einer prognostizierten mittleren Globalstrahlung von 0,0902 kW/m² erhält man unter Verwendung der MLR-Gleichung (10.14) einen Heizbedarf von -6,846 kWh, um die Raumtemperatur mit BKT auf einem vordefinierten Sollwert $\bar{T}_{R,Set}$ von 24 °C zu halten:

$$Q_{MLR,p} = 26,871 \text{ kWh} + (-1,877) \frac{\text{kWh}}{^\circ\text{C}} \cdot (24 \text{ }^\circ\text{C} - 7,7 \text{ }^\circ\text{C}) + (-34,606) \text{ m}^2 \text{ h} \cdot 0,0902 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2} = -6,846 \text{ kWh} \quad (10.14)$$

Dabei weist bei dieser Regression die prognostizierte mittlere Außentemperatur einen größeren Einfluss auf den prognostizierten Energiebedarf vor als die prognostizierte mittlere Globalstrahlung. Über die Gleichungen (10.11) bis (10.13) kann anschließend ein Energiepaket $Q_{TABS,p}$ von 19,649 kWh berechnet werden, das den BKT im zweiten Obergeschoss zugeführt werden muss. Da der Wert positiv ist und zudem der Energiebedarf einen negativen Wert vorweist, liegt Heizbetrieb vor.

Da die MOSMIX-Vorhersagen des DWD immer für die nächsten zehn Tage vorhanden sind, können auch Lastvorhersagen für die nächsten zehn Tage getätigt werden. Dies gewährt dem TABS-Betreiber eine gute Voraussicht bezüglich notwendigen Systemanpassungen. Tabelle 8 zeigt beispielhaft die Simulationsergebnisse für eine zehntägige Vorhersage der Heiz- bzw. Kühlbedarfe $Q_{MLR,p}$ und Heiz- bzw. Kühlenergiepakete $Q_{TABS,p}$ im zweiten Obergeschoss des RIZ Energie, unternommen am 24.02.2023. Die Nichtarbeitstage wurden dabei ausgelassen, da der Sollwert der Raumtemperatur $\bar{T}_{R,Set}$ von 24 °C in dem Fall nicht eingehalten werden muss und dementsprechend nur ein minimaler Heizbetrieb gefahren wird.

Tabelle 8 Beispielhafte Lastvorhersage mit MLR für das 2. Obergeschoss des RIZ Energie

Datum	Außenlufttemperatur (Prognose), °C	Globalstrahlung (Prognose), kW/m ²	Heiz-/Kühlbedarf $Q_{MLR,p}$, kWh	Heiz-/Kühlenergie $Q_{TABS,p}$, kWh
27.02.2023	0,17	0,1236	-22,141	62,616
28.02.2023	0,89	0,1597	-22,031	62,302
01.03.2023	1,69	0,1493	-20,161	57,014
02.03.2023	2,82	0,1433	-17,848	50,475
03.03.2023	3,49	0,1375	-16,381	46,326
06.03.2023	3,99	0,1412	-15,583	44,069

6. Vergleich mit historischen Daten

Zur Überprüfung des MLR-Algorithmus wurde die BKT-Lastermittlung mit MLR rückwirkend für das Jahr 2022 für die drei Büroebenen im Bürobereich simuliert, um die real gemessenen Heiz- bzw. Kühlenergiewerten der BKT im RIZ Energie vergleichen zu können. Da eine Fehlinterpretation der Kurven für die realen Messwerte in Abbildung 106 zu vermeiden sind, müssen vorab folgende Zusatzinformationen zu den Daten beachtet werden:

- Übergangsbetrieb der BKT im Frühling (10.03.2022 – 17.05.2022): minimaler Heizbetrieb mit Heizenergiewerten zwischen 0 kWh und 1 kWh
- Übergangsbetrieb der BKT im Herbst (16.09.2022 – 01.11.2022): minimaler Heizbetrieb mit Heizenergiewerten zwischen 0 kWh und 1 kWh
- Minimalbetrieb der BKT während der Ferienzeit (24.12.2022 – 31.12.2022): Heizbetrieb mit Heizenergiewerten zwischen 0 kWh und 1 kWh
- Keine Messdatenaufnahme von 25.06.2022 bis 07.08.2022 aufgrund des Austausches des Bussystems in der GLT: Energiewerte gleich null gesetzt

Diese Zusatzinformationen aus dem realen Betrieb kann der MLR-Algorithmus nicht berücksichtigen. Er berechnet die notwendigen Energiepakete zur Einhaltung der vordefinierten Raumtemperatur-Sollwerte konsequent für das gesamte Jahr. Weiterhin ist er datumsabhängig nicht an den Einsatz von Heiz- oder Kühlbetrieb gebunden und kann dementsprechend jederzeit den Modus wechseln.

Die Raumtemperatur-Sollwerte $\bar{T}_{R,Set}$ werden gemäß der DIN EN 15251 in Abhängigkeit des gleitenden Mittelwertes der Außentemperatur T_{rm} und nach Tabelle 7 bestimmt. Das heißt für $T_{rm} < 10\text{ °C}$ entspricht $\bar{T}_{R,Set}$ 22 °C, für $T_{rm} > 15\text{ °C}$ entspricht $\bar{T}_{R,Set}$ 24,5 °C und für den Intervall $10\text{ °C} > T_{rm} > 15\text{ °C}$ entspricht $\bar{T}_{R,Set}$ den linearisierten Werten.

Um die jeweiligen Einflüsse von Außenlufttemperatur und Globalstrahlung auf die Heiz- bzw. Kühlbedarfe $Q_{MLR,p}$ der einzelnen Büroebenen vergleichen zu können, werden nachfolgend die jeweiligen MLR-Regressionsgleichungen mit ihren Koeffizienten aufgelistet:

$$Q_{MLR,p,1.OG} = 32,299\text{ kWh} - 2,196 \frac{\text{kWh}}{\text{°C}} \cdot (\bar{T}_{R,Set} - \bar{T}_{amb,p}) - 32,904\text{ m}^2\text{h} \cdot \bar{I}_{glob,p} \quad (10.15)$$

$$Q_{MLR,p,2.OG} = 26,871\text{ kWh} - 1,877 \frac{\text{kWh}}{\text{°C}} \cdot (\bar{T}_{R,Set} - \bar{T}_{amb,p}) - 34,606\text{ m}^2\text{h} \cdot \bar{I}_{glob,p} \quad (10.16)$$

$$Q_{MLR,p,3.OG} = 31,198\text{ kWh} - 2,152 \frac{\text{kWh}}{\text{°C}} \cdot (\bar{T}_{R,Set} - \bar{T}_{amb,p}) - 36,646\text{ m}^2\text{h} \cdot \bar{I}_{glob,p} \quad (10.17)$$

Abbildung 106 zeigt die mit dem MLR-Algorithmus für das Jahr 2022 ermittelten täglichen BKT-Energiepakete $Q_{TABS,p}$ im Vergleich zu den gemessenen, täglich aufsummierten Werten für die drei Büroebenen des Bürobereichs. Die Profile von $Q_{TABS,p}$ ähneln denen der Messwerte insbesondere im Sommer, wenn im RIZ Energie real der Kühlbetrieb läuft. Im Januar und Februar kann mit dem MLR-Algorithmus der thermische Komfort mit niedrigeren Energiepaketen als im Realbetrieb erreicht werden.

Die Verläufe der Kurven für $Q_{TABS,p}$ ist für alle drei Büroebenen identisch, jedoch mit unterschiedlich hohen Ausschlägen. Dies ist durch die Koeffizienten der jeweiligen MLR-Gleichungen (10.15) bis (10.17) zu erklären. Die größten Maxima und Minima für Heiz- und Kühlenergiewerte sind im dritten Obergeschoss zu beobachten, da hier der Koeffizient c der Globalstrahlung einen höheren Einfluss als die der anderen Geschosse besitzt. Dieser Koeffizient ist für das zweite Obergeschoss mehr ausschlaggebend als für das erste Obergeschoss, jedoch hat hier der Koeffizient b der Temperatur ein geringeres Gewicht, zudem ist der Koeffizient a minimal. Deshalb liegen im zweiten Obergeschoss die geringsten Heiz- bzw. Kühlenergiewerte vor.

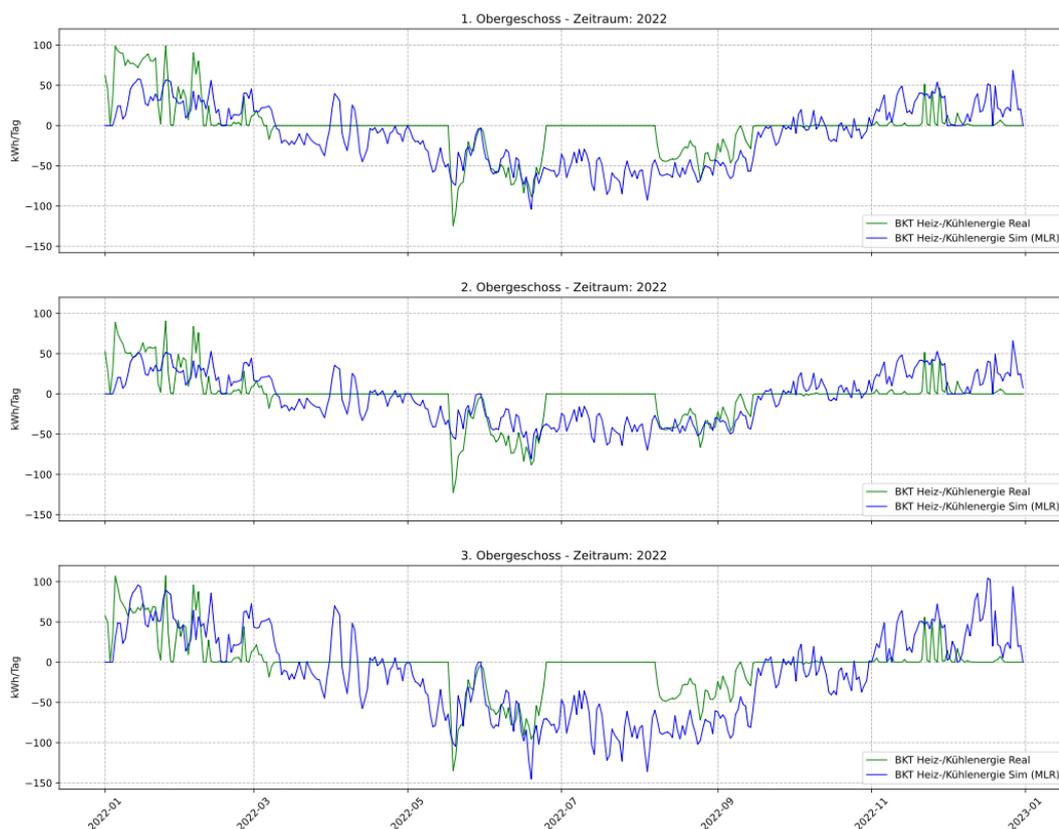


Abbildung 106 Gemessene und mit MLR simulierte BKT-Heiz- und Kühlenergiewerte pro Tag in den Büroebenen im Verwaltungstrakt des RIZ Energie für das Jahr 2022

Die Kurvenverläufe der mit dem MLR-Algorithmus ermittelten BKT-Energiewerte und die Koeffizienten der MLR-Gleichungen der jeweiligen Geschosse sind nicht überraschend. Der Energiebedarf für das dritte Obergeschoss (Dachgeschoss) hat aufgrund direkter Sonneneinstrahlung den größten Einfluss durch die Globalstrahlung, was sich im stärksten Koeffizienten c widerspiegelt. Aufgrund der Anfälligkeit für erhöhte Temperaturen ergeben sich demnach hier auch größere Kühlenergiewerte, als für das erste und zweite Obergeschoss. Die BKT müssen mehr leisten, um die gewünschte Raumtemperatur zu erreichen.

Abbildung 108 vergleicht die Raumtemperaturen der drei Büroebenen im Jahr 2022. Es ist klar zu erkennen, dass das dritte Obergeschoss generell die höchsten Raumtemperaturen vorweist. Wie in Abbildung 107 zu sehen, wurden hier die Grenzen der thermischen Komfortklassen nach DIN EN 15251 am stärksten und häufigsten verletzt. Auch dieser Umstand lässt die mit dem MLR-Algorithmus berechneten Kühlenergiewerte im dritten Obergeschoss plausibel erscheinen, die die realen Messwerte auch klar überschreiten (siehe Abbildung 106). Es wird mehr BKT-Leistung benötigt, um den hohen Raumtemperaturen entgegenwirken und den thermischen Komfort gewährleisten zu können.

Ob die teilweise im Vergleich zu den real eingesetzten erhöhten simulierten Energiepakete den thermischen Komfort in den Büroebenen verbessern können, wird in nächsten Abschnitt untersucht.

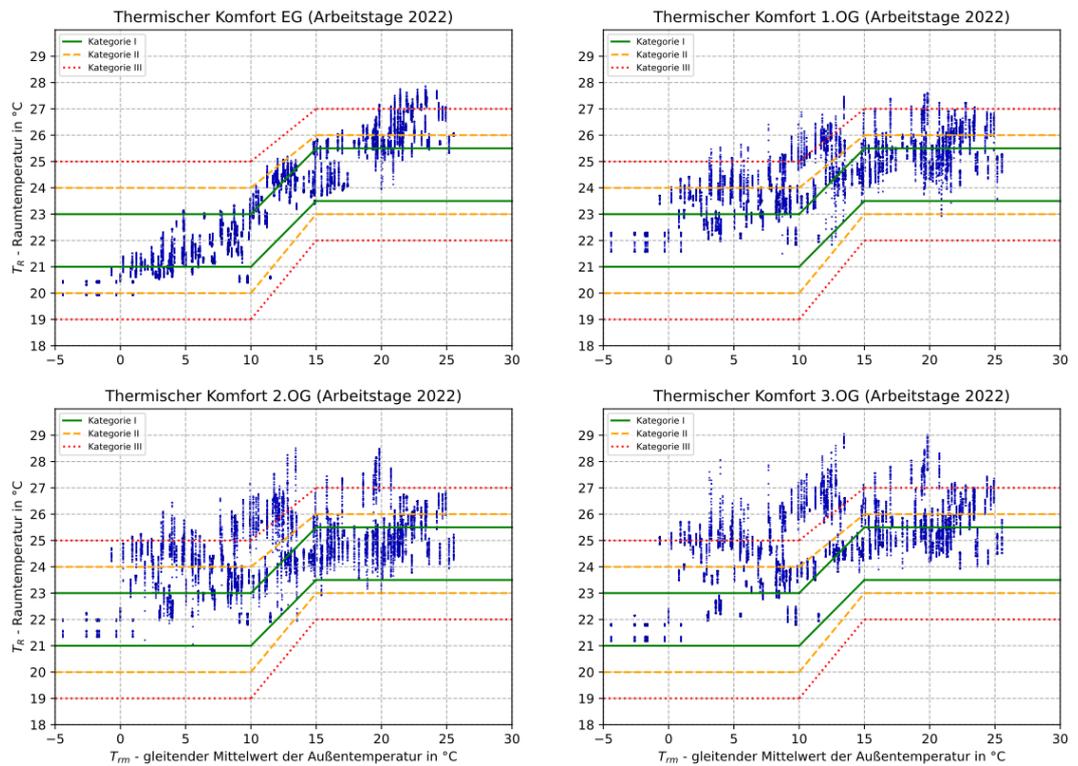


Abbildung 107 Gemessene Raumtemperaturen an Arbeitstagen im Jahr 2022 (8 Uhr bis 18 Uhr) im RIZ Energie über den gleitenden Mittelwert der Außentemperatur gemäß DIN EN 15251 [21]

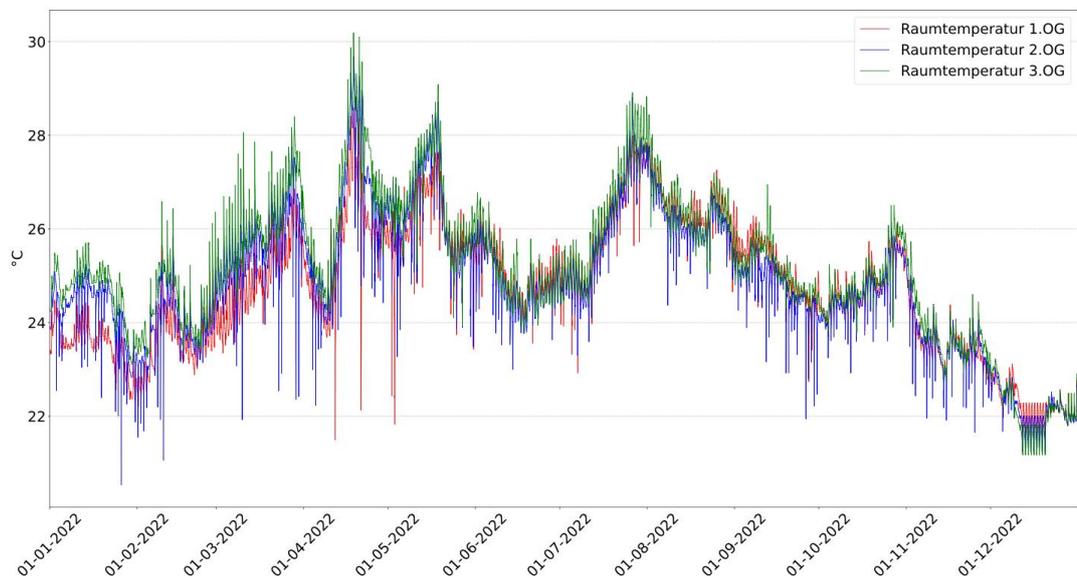


Abbildung 108 Gemessene Raumtemperaturen in den Büroebenen des RIZ Energie im Jahr 2022

7. Raumtemperaturen und thermischer Komfort

Um die Wirkung der mit dem MLR-Algorithmus ermittelten Heiz- und Kühlpakete für die BKT hinsichtlich des thermischen Komforts zu überprüfen, wurde die ursprüngliche Berechnung der TABS-Leistung im Gebäudemodell des dynamischen digitalen Zwillings durch die mit MLR ersetzt und ein Simulationslauf für das Jahr 2022 durchgeführt. Dabei wurde das modifizierte 5R1C-Modell nach DIN EN ISO 13790 eingesetzt.

In Abbildung 109 ist am Beispiel des zweiten und dritten Obergeschosses zu erkennen, dass unter Verwendung einer BKT-Steuerung mit MLR ein im Vergleich zu den Messwerten niedrigerer und stabilerer Raumtemperaturverlauf erreicht wird. Dies gilt auch gegenüber dem Verlauf der bisherigen Simulation (siehe hierzu Abbildung 101).

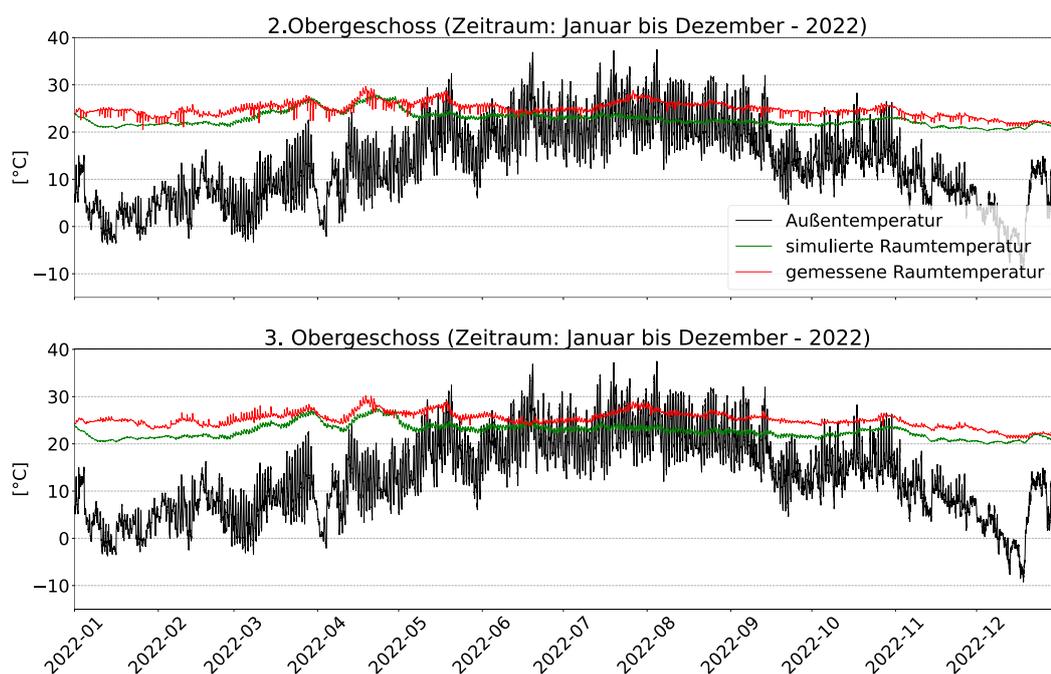


Abbildung 109 Vergleich der simulierten Raumtemperatur unter Einsatz des MLR-Algorithmus und der gemessenen Raumtemperatur im 2. und 3. Obergeschoss des RIZ Energie im Jahr 2022

Es wurde eine weitere Analyse des thermischen Komforts im Bürobereich für das Jahr 2022 nach der DIN EN 15251 vorgenommen, dieses Mal mit den simulierten Raumtemperaturen unter Verwendung des MLR-Algorithmus zur Steuerung der BKT. Dabei wurden nur Arbeitstage von jeweils 8 Uhr bis 18 Uhr betrachtet.

Abbildung 110 zeigt, dass mit der Verwendung der prädiktiven BKT-Steuerung mit MLR ein konstanter hoher thermischer Komfort in allen Geschossen des Verwaltungstraktes gewährleistet werden kann. Die Temperaturen befinden sich häufig im Toleranzbereich der Komfortklasse I nach DIN EN 15251 und verletzen nur sehr vereinzelt und minimal die äußerste Toleranzgrenze der Komfortklassen III.

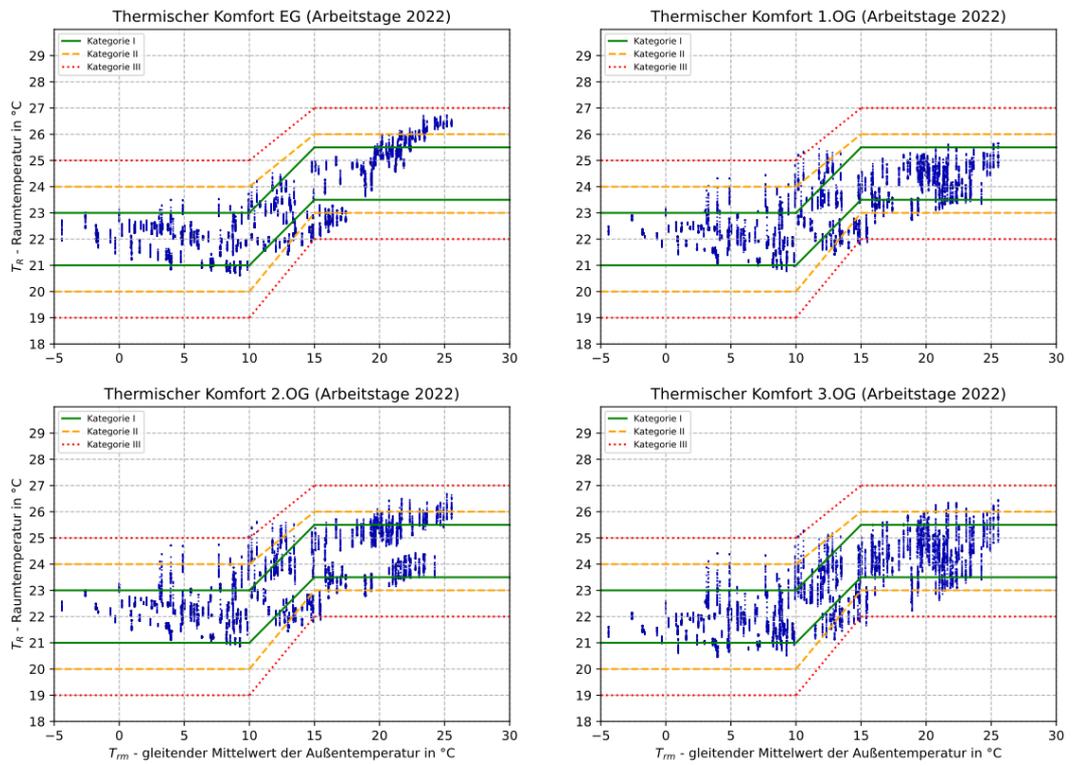


Abbildung 110 Simulierte Raumtemperaturen unter Einsatz des MLR-Algorithmus an Arbeitstagen im Jahr 2022 (8 Uhr bis 18 Uhr) im Verwaltungstrakt des RIZ Energie über den gleitenden Mittelwert der Außentemperatur gemäß DIN EN 15251 [26].

10.2 Optimierung bei Übergangsbetrieb

Durch die in Kapitel 3.2.1 erkannten Fehler konnten durch Umsetzung der Handlungsempfehlungen der Übergangsbetrieb optimiert werden. Im Folgenden werden die Monate April 2022 und April 2023 verglichen, um zu veranschaulichen, wie die Fehlerbehebung zu einem erhöhten thermischen Komfort geführt hat.

Zunächst wurde am 16.03.23 vom Heizbetrieb in den Übergangsbetrieb umgestellt. Zuvor wurden diejenigen Bausteine in der GLT-Programmierung entfernt, die für die 5K-Offsets in der Sollwertfindung der TABS Regelung gesorgt haben. Nun kann ausgewertet werden wie sich diese Maßnahmen auf den Gebäudebetrieb in der Übergangszeit ausgewirkt haben.

Das rechtzeitige Einschalten des Übergangsbetriebs hat eine Aktivierung des automatisierten Sonnenschutzes zur Folge. Wie Abbildung 111 zeigt reagiert der Sonnenschutz auf die erhöhte Globalstrahlung an der Westfassade und schließt rechtzeitig (vgl. Abbildung 37).

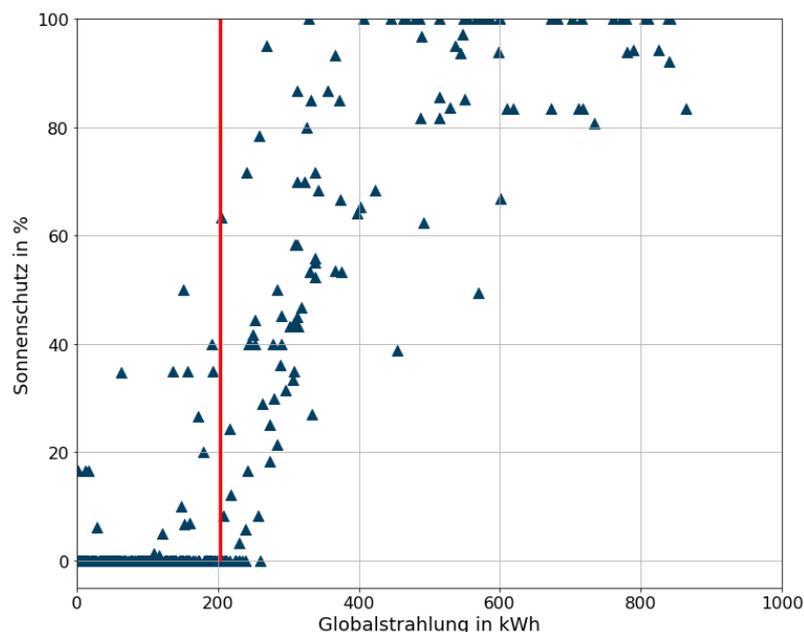


Abbildung 111: Position des Sonnenschutzes (0 % entspricht vollständig geöffneten und 100 % vollständig geschlossenen Jalousien) über der Globalstrahlung an der Westfassade im April 2023 und Schwellenwert für die Jalousiensteuerung in Anwesenheitszeiten (in rot)

Folglich wirkt sich das auch positiv auf die Raumtemperaturen im Gebäude aus. Wie Abbildung 112 und Abbildung 113 zeigen bleibt die Raumtemperatur, unabhängig von der Globalstrahlungssumme, innerhalb des Komfortbereichs (vgl. Abbildung 35 und Abbildung 36).

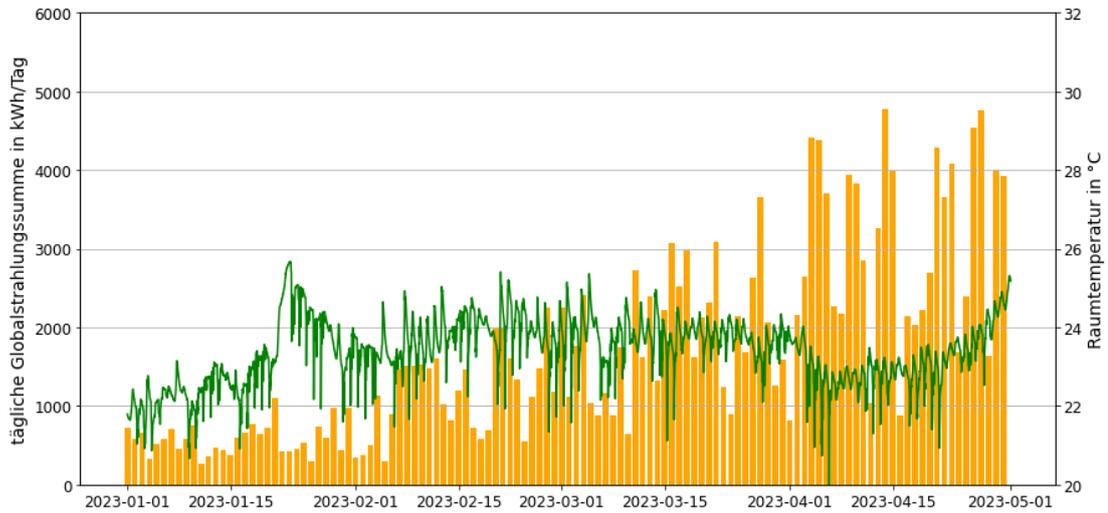


Abbildung 112: Zeitreihe der Raumtemperatur und Summe der täglichen Globalstrahlung von Januar bis April 2023

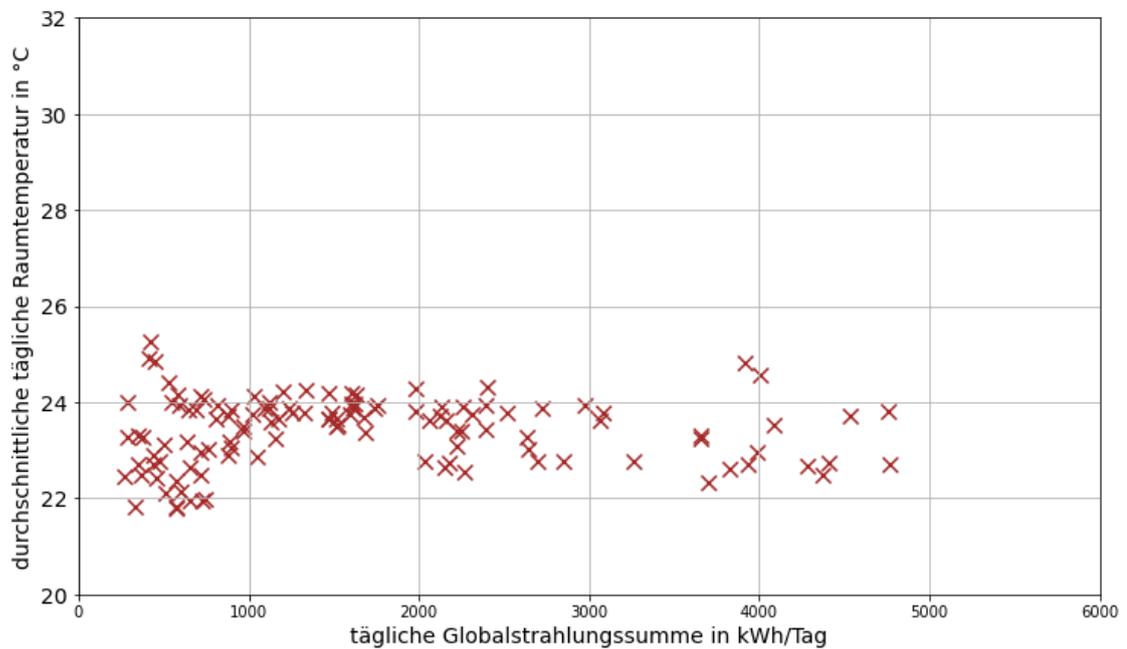


Abbildung 113: Streudiagramm der durchschnittlichen Raumtemperatur über der täglichen Globalstrahlungssumme von Januar bis April 2023

Schlussendlich ist im Komfortdiagramm für den April 2023 (siehe Abbildung 114) deutlich zu erkennen, dass durch die umgesetzten Fehlerbehebungsmaßnahmen ein Übergangsbetrieb innerhalb des Komfortbereichs erreicht wurde (vgl. Abbildung 32).

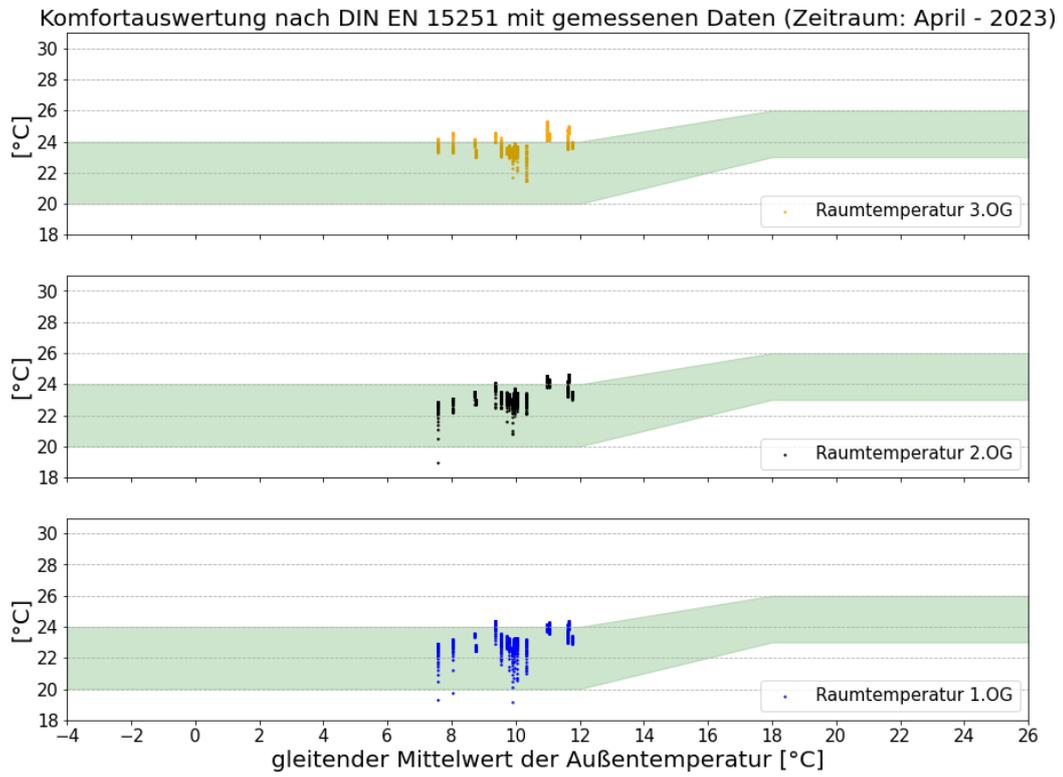


Abbildung 114: Komfortauswertung nach DIN EN 15251 mit gemessenen Daten. Zeitraum: April 2023

11 Projektmitarbeiter und Mitwirkende

Während der drei Jahre Projektlaufzeit haben zahlreiche Mitarbeiter der sechs Projektpartner am Projekt mitgewirkt und in verschiedensten Arbeitsbereichen Erfahrungen gesammelt. Im Folgenden werden alle Projektmitarbeiter und Mitwirkende nach Projektpartnern sortiert aufgelistet:

Hochschule Offenburg:

Danny Carvajal, Sascha Reißmann, Leroy Tomás, Jens Pfafferott, Jan Höfflin, Ishan Chopra, Yaman Al-Riyalat, Eduard Bolinger, Daniel Hierholzer, Kousha Pourramedani

Fraunhofer ISE:

Gesa Benndorf, Moritz Ihlenburg, Sebastian Zehnle, Nicolas Réhault

Testo:

Michael Kampferbeck, Sarah Eisenkolb, Maren Müller, Timon Tscheulin, Peter Liebetaut, Benjamin Landenberger, Luca Baier, Mike Muhl, Martin Zubler, Axel Gomeringer, Janosch Kneer

Mondas:

Christian Reetz, Duarte de Brito, Jonas Möllers

Konzmann:

Markus Putz, Matthias Rückert

Maurer:

Simon Glatz

12 Außenwirkung

12.1 Veröffentlichungen

Liste der Veröffentlichungen:

Benndorf, G.; Ihlenburg, M.; Réhault, N. (2021): MoTive – Interaktives Anlagenschema zur BIMbasierten Unterstützung eines technischen Monitorings. In: HLH 72 (06), S. 55–58. DOI: 10.37544/1436-5103-2021-06.

Im Rahmen des 3. EWB-Kongresses wurde am 09./10. Juni 2022 ein Poster präsentiert.

Carvajal, D. Modellbasierte Inbetriebnahme. 3. EWB-Kongresses, 9.-10.6.2022.

Carvajal et al. Digitale Inbetriebnahme. In: Forschung im Fokus 2023, HS Offenburg

12.2 Workshops

Im Rahmen eines Unterauftrages an Testo SE & Co. KGaA wurden durch Fraunhofer ISE zwei Workshops zu BIM Datenformaten durchgeführt (9.10.20 und 3.11.20).

Am 21.06.2023 fand die öffentliche Abschlusskonferenz für das Projekt BUiLD.DIGITIZED an der Hochschule Offenburg statt.

13 Fazit und Ausblick

Mit dem Abschluss des Projekts BUiLD.DIGITIZED sind alle Meilensteine und Projektziele erfolgreich abgeschlossen.

Es wurde mit Erfolg ein digitaler Zwilling des RIZ Energie aufgebaut, welcher mithilfe von BIM Methoden parametrisiert wurde. Das Anlagenmodell wurde nach Betriebsparametern simuliert und stellt den Gebäudebetrieb möglichst realitätsnah dar. Der digitale Zwilling ist mit den realen Messdaten des Gebäudes verknüpft und wird monatlich simuliert. Dazu wurde ein Automatisierungsalgorithmus erstellt, sodass die monatliche Datenaufbereitung, Simulation und Fehlererkennung vollautomatisch und ohne zusätzlichen Arbeitsaufwand durchgeführt werden können.

Im Laufe des Projekts wurden manuelle, regelbasierte und modellbasierte Methoden zur Fehlererkennung eingesetzt. Dabei wurden Unterschiede in der Effektivität und Einsetzbarkeit der verschiedenen Fehlererkennungsmethoden festgestellt. Das entwickelte Werkzeug MoTive ermöglichte die digitale Zusammenführung von Informationen aus verschiedenen Datenquellen für technisches Monitoring gemäß AMEV-TMon. Es extrahierte relevante Daten aus BIM-Planungen und verknüpfte sie mit AMEV-Prüfgrößen für verschiedene technische Anlagen. MoTive erleichtert die Inbetriebnahme gebäudetechnischer Anlagen und Prozesse der energetischen Betriebsoptimierung, indem es automatische Sensorabgleiche ermöglichte und dabei Modellunzulänglichkeiten aufdeckte. Allerdings erforderte die automatisierte Sensor-Lokalisation noch manuelle Zwischenschritte, was für künftige Arbeiten mit MoTive noch weiter verbessert werden kann.

Das technische Monitoring des RIZ Energie wurde erfolgreich mit einem Metadatenkonzept aufgesetzt und implementiert, welches strukturierte Datenabfragen ermöglicht hat. Dabei diente das Monitoring, in Form der mondas Monitoringplattform, als zentrale Verknüpfung verschiedener Arbeitspakete und ermöglichte gezielte Datenabfragen, sowie anschließende Analysen und Auswertungen.

Mit Abschluss des Forschungsprojekts ist die Inbetriebnahme des Gebäudes vollständig abgeschlossen. Dazu wurden zahlreiche digitale Methoden zur Fehlererkennung und Bewertung von Optimierungsmaßnahmen, sowie zur Ermittlung von Performancekennzahlen eingesetzt. Somit wurde das RIZ Energie als hocheffizientes Niedrigstenergiegebäude in Betrieb genommen, welches netzdienlich agiert und alle EnEV-Anforderungen für Neubauten deutlich übersteigt. Das netzdienliche Agieren wurde in erster Linie durch die modellprädiktive Regelung der Wärmepumpe ermöglicht, die unter Berücksichtigung des Strompreises und den dementsprechenden Annahmen über den Netzzustand, prädiktiv handelte und dabei die Speicherkapazitäten des Gebäudes nutzte.

Als hocheffizientes Nichtwohngebäude schneidet das RIZ Energie beim Primär- und Endenergiebedarf besser als alle vergleichbaren Gebäude ab. Auch die für den Energiebedarfsausweis ermittelten Kennzahlen konnten im realen Betrieb noch leicht verbessert werden, was nicht zuletzt der Umsetzung zahlreicher Energieeinsparmaßnahmen zu verdanken ist. In der letzten Phase der Inbetriebnahme wurde schlussendlich mit betriebsbegleitenden Optimierungen begonnen, die weiterhin fortgesetzt werden, um einen optimalen Gebäudebetrieb zu ermöglichen.

Die Entwicklung einer VOC und IAQ-Messtechnik erzielte Fortschritte und neue Erkenntnisse bei der Messung von Feinpartikeln und VOC-Konzentrationen. Dabei wurden verschiedene Sensorprototypen für Testmessungen in die bestehende Sensorlandschaft im RIZ Energie eingebettet und dazu genutzt das Monitoring zu ergänzen, sowie die Arbeitsplatzqualität vor Ort zu bewerten.

Die Erfahrungen des Forschungsprojekts BUiLD.DIGITIZED zeigen, welches Potential der Einsatz von digitalen Methoden in der Inbetriebnahme von Neubauten bietet. Das RIZ Energie bot durch die ausgeprägte Sensorlandschaft und der modernen und hocheffizienten TGA ein ausgezeichnetes Testobjekt an dem innovative digitale Methoden eingesetzt konnten. Für das Monitoring des Gebäudes mussten so beispielsweise Lösungen gefunden werden, um die hohe Datenmenge zu verwalten, die aufgrund der detaillierten Auswertungen des Gebäudes erforderlich waren. Dazu musste mit unterschiedlichen Kommunikationsprotokollen gearbeitet werden, die schlussendlich zentral auf der Monitoringplattform aufliefen. Weiterhin wurde eine bidirektionale Kommunikation zu dem Gebäude eingerichtet, um über intelligente Regelalgorithmen Steuerungssignale an die GLT des Gebäudes zu setzen.

Besonders herausfordernd war die Arbeit mit BIM Modellen, die von Planern und Architekten zwar bereits im Einsatz sind, für die es aber oft keine einheitlichen Formate gibt. Somit ist das Zusammenführen von verschiedenen Modellen mühsam und zeitaufwendig, was besonders für die Parametrisierung von Gebäudemodellen und einem vollständigen digitalen Zwilling wichtig ist. Der Einsatz von BIM Methoden wird künftig dennoch mit Sicherheit an Bedeutung gewinnen und durch Erfahrungen, die bereits jetzt gesammelt werden, zu einem wichtigen Bestandteil bei der Planung und Inbetriebnahme von Gebäuden.

14 Literaturverzeichnis

- [1] Hochschule Offenburg, „SHK.4.FutureEnergySystems: SHK4Future - Container.“.
- [2] D. Carvajal, „Technischer Bericht Gebäudemodellierung,“ 2023. [Online]. Available: https://build-digitized.hs-offenburg.de/fileadmin/Sonstige_Unterseiten/build-digitized/files/BUiLD_DIGITIZED_TechnischerBerichte_Geb%C3%A4udemodellierung.pdf.
- [3] Verein Deutscher Ingenieure, VDI 6039: Inbetriebnahmemanagement, Berlin: Beuth Verlag, 2011.
- [4] Arbeitskreis Maschinen- und Elektrotechnik staatlicher und kommunaler Verwaltungen (AMEV), Technisches Monitoring als Instrument zur Qualitätssicherung, Empfehlung Nr. 158, 2020.
- [5] Federation of European Heating, Ventilation and Air Conditioning Associations, Qualitätsmanagement für Gebäude - Verbesserung der Gebäude-Performance durch Technisches Monitoring und Inbetriebnahmemanagement, 2019.
- [6] Verein Deutscher Ingenieure, Sicherheitstechnische Einrichtungen für Gebäude - Vollprobetest und Wirkprinzipprüfung, Berlin, 2015.
- [7] J. Mattmüller, G. Benndorf und P. Preitner, „Automatisierte Generierung von digitalen Anlagenschemata,“ in *Proceedings of BauSIM 2022 - 9th Conference of IBPSA Germany and Austria*, 2022.
- [8] Neumann et al., Endbericht ModBen - Modellbasierte Methoden für die Fehlererkennung und Optimierung im Gebäudebetrieb, 2011.
- [9] L. Tomás, „Fehlererkennung und -diagnose TABS,“ 2023. [Online]. Available: https://build-digitized.hs-offenburg.de/fileadmin/Sonstige_Unterseiten/build-digitized/files/BUiLD_DIGITIZED_TechnischerBericht_FED_TABS.pdf.
- [10] E. Sewe, Automatisierte Fehlererkennung in Heizungsanlagen, 2018.
]
- [11] D. Carvajal, „Einsatz eines digitalen Zwillings zur modellbasierten Online-Fehlererkennung der Lüftungsanlage des RIZ Energie,“ 2023. [Online]. Available: https://build-digitized.hs-offenburg.de/fileadmin/Sonstige_Unterseiten/build-digitized/files/BUiLD_DIGITIZED_TechnischeBerichte_Fehlererkennung.pdf.
- [12] D. Carvajal und I. Chopra, „Technischer Bericht Datenaufbereitung,“ 2023. [Online]. Available: https://build-digitized.hs-offenburg.de/fileadmin/Sonstige_Unterseiten/build-digitized/files/BUiLD_DIGITIZED_TechnischerBerichte_Datenaufbereitung.pdf.
- [13] S. Reißmann, „Inbetriebnahme und digitales Monitoring von Gebäuden gemäß Regelwerken,“ 2021. [Online]. Available: https://build-digitized.hs-offenburg.de/fileadmin/Sonstige_Unterseiten/build-digitized/files/BUiLD_DIGITIZED_TechnischeBerichte_Inbetriebnahme_DigitalesMonitoring.pdf. [Zugriff am 2023].

- [14 Kalz et al., „The impact of auxiliary energy on the energy efficiency of the heating and cooling systems: monitoring of low-energy buildings. Energy and Buildings,“ 2009;41(10):1019e30..
- [15 K. Voss, S. Herkel, D. Kalz, T. Lützkendorf, A. Maas und A. Wagner, Performance von Gebäuden,] Fraunhofer IRB Verlag, 2016.
- [16 S. Reißmann, „Technischer Bericht Energieeinsparungspotential,“ 2021. [Online]. Available:] https://build-digitized.hs-offenburg.de/fileadmin/Sonstige_Unterseiten/build-digitized/files/BUiLD_DIGITIZED_TechnischerBerichte_Energieeinsparungspotential.pdf.
- [17 M. Böck, „Fortgeschrittene Methoden der nichtlinearen Regelung - Wintersemester] 2016/2017,“ 2016. [Online]. Available: <https://www.acin.tuwien.ac.at/file/teaching/master/fortgeschrMethodenNichtlinReg/WS2016/FMNR.pdf>. [Zugriff am 2023].
- [18 J. Höfflin, „Optimierung des Betriebes von thermoaktiven Bauteilsystemen mit] simulationsgestützten und prädiktiven Steuerungsalgorithmen,“ 28 02 2023. [Online].
- [19 J. Tödtli et al., „TABS Control. Steuerung und Regelung von thermoaktiven Bauteilsystemen,] Zürich: Faktor Verlag, 2009.“.
- [20 Tödtli et al., „Regelung und Steuerung von thermoaktiven Bauteilsystemen (TABS),“ Bauphysik,] pp. 319-325, 2009.“.
- [21 Gwerder et al., „Control of thermally-activated building systems (TABS), Applied Energy , pp.] 565-581, 2008.“.
- [22 M. Koschenz und B. Lehmann, „Thermoaktive Bauteilsysteme tabs, Dübendorf (Schweiz):] Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt EMPA, 2000.“.
- [23 Tödtli et al., „Integrated Design of Thermally Activated Building Systems and of their Control,“] in 9th REHVA World Congress for Building Technologies – CLIMA 2007, Helsinki, 2007.“.
- [24 Deutsches Institut für Normung e.V., „DIN V 18599-2018: Energetische Bewertung von] Gebäuden – Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung, Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2018.“.
- [25 M. Schmelas, „Entwicklung und Evaluierung eines adaptiv-prädiktiven Algorithmus' für] thermoaktive Bauteilsysteme [Dissertation], Freiburg: Albert-Ludwigs-Universität, Technische Fakultät, Institut für Mikrosystemtechnik (IMTEK), 2017.“.
- [26 Deutsches Institut für Normung e.V., „DIN EN 15251:2012-12: Eingangsparemeter für das] Raumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden -Raumluftqualität, Temperatur, Licht und Akustik; Deutsche Fassung EN 15251:2007, Berlin, 2012.“.
- [27 E. Bollin und M. Schmelas, „TABS - Thermoaktive Bauteilsysteme: Selbstlernendes und] vorausschauendes Steuern mit AMLR, Wiesbaden: Springer, 2021.“.
- [28 M. Schmelas et al., „Adaptive Predictive Control of Thermo-Active Building Systems (TABS)] based on a Multiple Regression Algorithm,“ Energy and Buildings, pp. 14-28, 10 Juni 2015“.
- [29 B. Gutzmann und A. Motl, „wetterdienst,“ Zenodo, doi: 10.5281/zenodo.7618795, 2023“.
-]

[30 J. Mattmüller, G. Benndorf und P. Preintner, „Automatisierte Generierung von digitalen Anlagenschemata,“ in *Proceedings of BauSIM 2022 - 9th Conference of IBPSA Germany and Austria*, 2022.

15 Anhang

Der Anhang ist unter folgendem Link aufrufbar:

<https://doi.org/10.6084/m9.figshare.24786873.v1>