

# OBSERVE

## Arbeitspaket AP A.3

### Modellbildung, Unsicherheitsbewertung, Sensitivitätsanalyse, Optimierung

Förderkennzeichen: 03ET1225B

**Nicolas Réhault,**

Sebastian Zehnle,

Thorsten Müller-Eping

nicolas.rehault@ise.fraunhofer.de  
sebastian.zehnle@ise.fraunhofer.de  
thorsten.mueller-eping@ise.fraunhofer.de

Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme ISE

Heidenhofstr. 2, 79110 Freiburg

4. März 2019

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie

**Zuwendungsempfänger:**

Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme ISE

Heidenhofstr. 2, 79110 Freiburg

**Förderkennzeichen:**

03ET1225B

**Vorhabensbezeichnung:**

OBSERVE: Optimierung und Betriebsführung komplexer Gebäudeenergieversorgungsanlagen;

Teilprojekt: Dezentrale Netzwerkregelungen und Lernende prädiktive Regelungen

**Laufzeit des Vorhabens:**

01.09.2014 - 31.08.2017

**Berichtszeitraum:**

01.09.2014 - 31.12.2014

# Inhaltsverzeichnis

<b>3 AP A.3 Modellbildung, Unsicherheitsbewertung, Sensitivitätsanalyse, Optimierung</b>	<b>4</b>
3.1 Einleitung und Zielsetzung . . . . .	4
3.2 Modellierung, Kalibrierung und Betriebsoptimierung . . . . .	5
3.2.1 Einleitung und Zielsetzung . . . . .	5
3.2.2 Numerische Optimierung von Simulationsparametern . . . . .	5
3.2.3 Demonstrationsgebäude Polizeidirektion Mettmann . . . . .	6
3.2.4 Modellbildung . . . . .	8
3.2.4.1 Hochtemperaturwärme-Kreislauf . . . . .	8
3.2.4.2 Niedertemperaturwärme-Kreislauf . . . . .	17
3.2.4.3 Mehrzonengebäudemodell mit Betonkern-Aktivierung . . . . .	19
3.2.5 Versorgung der RLT-Anlagen 1, 2, 3 und 5 . . . . .	24
3.2.6 Kalibrierung . . . . .	25
3.2.7 Ergebnisse der nominalen Simulationsmodelle der HT- und NT-Versorgung . . . . .	31
3.2.8 Verbesserte Betriebsstrategien für die thermische Bauteilaktivierung . . . . .	34
3.2.9 Optimierung von Betriebsparametern . . . . .	41
3.2.10 Fazit und Ausblick . . . . .	44
3.3 Berücksichtigung von Unsicherheiten in Wetterprognosedaten . . . . .	48
3.4 Modellierung von Fehlern in TGA-Anlagen . . . . .	53
3.4.1 Hintergrund . . . . .	53
3.4.2 Werkzeuge . . . . .	53
3.4.3 Methodik . . . . .	53
3.4.4 Fehlermodellierung in Komponenten . . . . .	53
3.4.5 Fehlermodellierung in Systemen . . . . .	55
3.4.5.1 Hochtemperaturwärme-Kreislauf . . . . .	55
3.4.5.2 Niedertemperaturwärme-Kreislauf . . . . .	56
3.4.6 Ergebnisse . . . . .	58
3.4.6.1 Hochtemperaturwärme-Kreislauf: . . . . .	58
3.4.6.2 Niedertemperaturwärme-Kreislauf . . . . .	60
3.5 Qualitative Modelle zur Fehlererkennung . . . . .	67
3.5.1 Einleitung . . . . .	67
3.5.2 Mathematische Grundlagen . . . . .	68
3.5.2.1 Vektoren, Matrizen und Tensoren . . . . .	68
3.5.2.2 Produkte der linearen und multilinearen Algebra . . . . .	69
3.5.3 Stochastische Automaten . . . . .	70
3.5.3.1 Grundlagen . . . . .	70
3.5.3.2 Beobachtung . . . . .	71
3.5.3.3 Fehlererkennung . . . . .	73
3.5.4 Qualitatives Modell . . . . .	74
3.5.4.1 Quantisierung . . . . .	74
3.5.4.2 Qualitative Modellbeschreibung . . . . .	76
3.5.4.3 Qualitative Modellbildung . . . . .	77
3.5.4.4 Qualitative Beobachtung . . . . .	77
3.5.4.5 Qualitative Fehlererkennung . . . . .	78
3.5.4.6 Speicherbedarf qualitativer Modelle . . . . .	80

3.5.5	Qualitative Modelle in dekomponierter Tensorrepräsentation . . .	81
3.5.5.1	CP-Tensordekomposition . . . . .	81
3.5.5.2	CP-Repräsentation stochastischer Automaten . . . . .	81
3.5.5.3	CP-Beobachtergleichung . . . . .	82
3.5.5.4	Qualitativer CP-Beobachteralgorithmus . . . . .	83
3.5.6	Anwendungsbeispiele qualitativer Modelle zur Fehlerdetektion .	83
3.5.6.1	fehlerhafte Sollwert-Temperatur für den BHKW-Vorlauf .	83
3.5.6.2	Ausgefallener Wärmeerzeuger im BHKW-Kreis . . . . .	87
3.5.7	Fazit . . . . .	87
	<b>Literatur</b>	<b>89</b>

## **3 AP A.3 Modellbildung, Unsicherheitsbewertung, Sensitivitätsanalyse, Optimierung**

### **3.1 Einleitung und Zielsetzung**

In diesem AP wurden White-Box Simulationsmodelle entwickelt, mit dem Ziel, Optimierungsstrategien für einen energieeffizienten Gebäudebetrieb abzuleiten. Darüber hinaus bilden diese Modelle die Grundlage für Unsicherheitsbewertungen und Sensitivitätsanalysen. Außerdem wurden in AP A.3 Black-Box Modelle zur Fehlererkennung entwickelt, die man als qualitative Modelle bezeichnet. Im Rahmen des Projekts wurden diese sehr speicherintensiven Modelle insbesondere im Hinblick auf die Modellreduktion weiterentwickelt, was einen erheblichen Fortschritt darstellt und diese Modelle für komplexe Systeme anwendbar macht. Für die Modellreduktion kommt eine moderne Methode, die in der Mathematik als Tensordekomposition bekannt ist, zum Einsatz. Basierend auf dieser Methodik wurden Algorithmen zur qualitativen Fehlererkennung entwickelt und getestet. Zudem wurden Synergien zwischen den White- und Black-Box Modellen abgeleitet. So konnten Fehlersimulationen auf Basis der White-Box Modelle, als Grundlage für ein Testumfeld zur Validierung der Fehlererkennung mit qualitativen Modellen, genutzt werden.

## 3.2 Modellierung, Kalibrierung und Betriebsoptimierung

### 3.2.1 Einleitung und Zielsetzung

Für die Entwicklung von Fehlererkennungsmethoden des sogenannten „überwachten Lernens“ in der Arbeitsgruppe Betriebsführung am Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme werden Simulationsmodelle benötigt, welche nominale und fehlerhafte Betriebszustände thermohydraulischer Anlagensysteme abbilden. Im Rahmen vom Arbeitspaket 3 hat Herr Jakob Merck zwischen dem 11.05.2015 und 11.11.2015 eine Masterarbeit mit dem Titel „Modellierung, Kalibrierung und Betriebsoptimierung eines thermohydraulischen Gebäudeanlagensystems mit Modelica“ [28] verfasst. Dabei wurde das Heiz- und Kühlsystem des Gebäudes der Kreispolizeibehörde in Mettmann (vgl. AP2) in der Modellierungsumgebung MODELICA<sup>®</sup> abgebildet und mithilfe von Messwerten kalibriert. Neben dem nominalen Modell wurden Fehlermodelle entwickelt. Anschließend wurden die Modelle sowie Messdaten genutzt, um Optimierungspotentiale beim Gebäudebetrieb zu identifizieren. Dabei wurden numerische Optimierungsmethoden verwendet, um einen höheren thermischen Komfort sowie niedrigere Energiekosten und CO<sub>2</sub>-Emissionen zu erzielen.

*Sowohl der Text als auch die Abbildungen dieses Abschnitts 3.2 wurden der Masterarbeit von Jakob Merck [28] entnommen.*

### 3.2.2 Numerische Optimierung von Simulationsparametern

Ziel der numerischen Optimierung ist es, die Werte von Simulationsparametern zu bestimmen, welche eine zu definierende Kostenfunktion des Systems minimieren. Da die Optimierungsfunktion, die die Software DYMOLA<sup>®</sup> bereitstellt, keine Einsichten in den Optimierungsalgorithmus ermöglicht, wurde im Projekt OBSERVE das Programm GENOPT<sup>®</sup>, das von Michael Wetter am Lawrence Berkeley National Laboratory entwickelt wurde, gewählt. Vorteile von GENOPT<sup>®</sup> sind, dass die Software mit jedem Simulationsprogramm gekoppelt werden kann, welches seine Kostenfunktion berechnet, ohne erneut kompilieren zu müssen, dass keine Angaben zum Gradienten der Kostenfunktion benötigt werden und, dass anhand einer Bibliothek ein Optimierungsalgorithmus gewählt werden kann, ohne das Programm kompilieren zu müssen.

Der Programmablauf einer Optimierung mit GENOPT<sup>®</sup> und MODELICA<sup>®</sup> funktioniert über eine Kopplung der beiden Programme. Dabei schreibt GENOPT<sup>®</sup> die Werte der zu variieren den Parameter in ein Textdokument. Dieses wird von MODELICA<sup>®</sup> eingelesen, die Simulation gestartet und die Kostenfunktion in einem weiteren Textdokument ausgegeben. Dieses Dokument wird anschließend von GENOPT<sup>®</sup> ausgewertet. Die Steuerung dieser Prozesse kann ebenfalls über Genopt<sup>®</sup> erfolgen.

Die Wahl des Optimierungsalgorithmus richtet sich nach der Art von Optimierungsproblem. Hier wird zwischen Problemen mit kontinuierlichen, mit diskreten oder mit kontinuierlichen und diskreten Variablen unterschieden. Es wird ein hybrider Algorithmus verwendet, welcher Probleme mit kontinuierlichen und diskreten Variablen lösen kann. Der mathematischen Beschreibung des Programms zufolge wird zuerst eine Particle Swarm Optimierung durchgeführt. Dabei wird eine Population von Optimierungsvorgängen (auch Schwarm genannt) erzeugt und gleichmäßig über den Raum der möglichen Parameterkombinationen verteilt. Jeder Optimierungsvorgang (auch Partikel genannt) verändert laut [17] seine Parameter der folgenden Generation anhand seines

eigenen Optimums, wird jedoch auch durch das Optimum des gesamten Schwarms beeinflusst. Die Anzahl der Simulationsgenerationen kann dabei durch den Nutzer spezifiziert werden. Anschließend wird der Hooke-Jeeves Algorithmus angewandt, welcher zur Klasse der Generalized Pattern Search Algorithmen gehört. Als Startwerte dienen die optimierten Parameter der PSO. Dabei werden die Parameter nacheinander variiert, bis die Kostenfunktion nicht weiter reduziert werden kann. Anschließend wird die Schrittweite verringert und erneut nach einem Minimum gesucht.

### 3.2.3 Demonstrationsgebäude Polizeidirektion Mettmann

Zur Umsetzung der beschriebenen Methode wurde das Gebäude der Kreispolizeibehörde in Mettmann (KPBM), Nordrhein-Westfalen, untersucht. Dieses Gebäude ist seit dem Jahr 2005 Arbeitsplatz von etwa 250 Polizistinnen und Polizisten, welche dort hauptsächlich Bürotätigkeiten nachgehen.

Energiekonzept: Die Konditionierung der Nutzräume, die Bereitstellung von Brauchwarmwasser sowie der Betrieb von raumluftechnischen Anlagen (RLT-Anlagen) erfolgt über ein in Abbildung 3.1 dargestelltes Energiesystem.

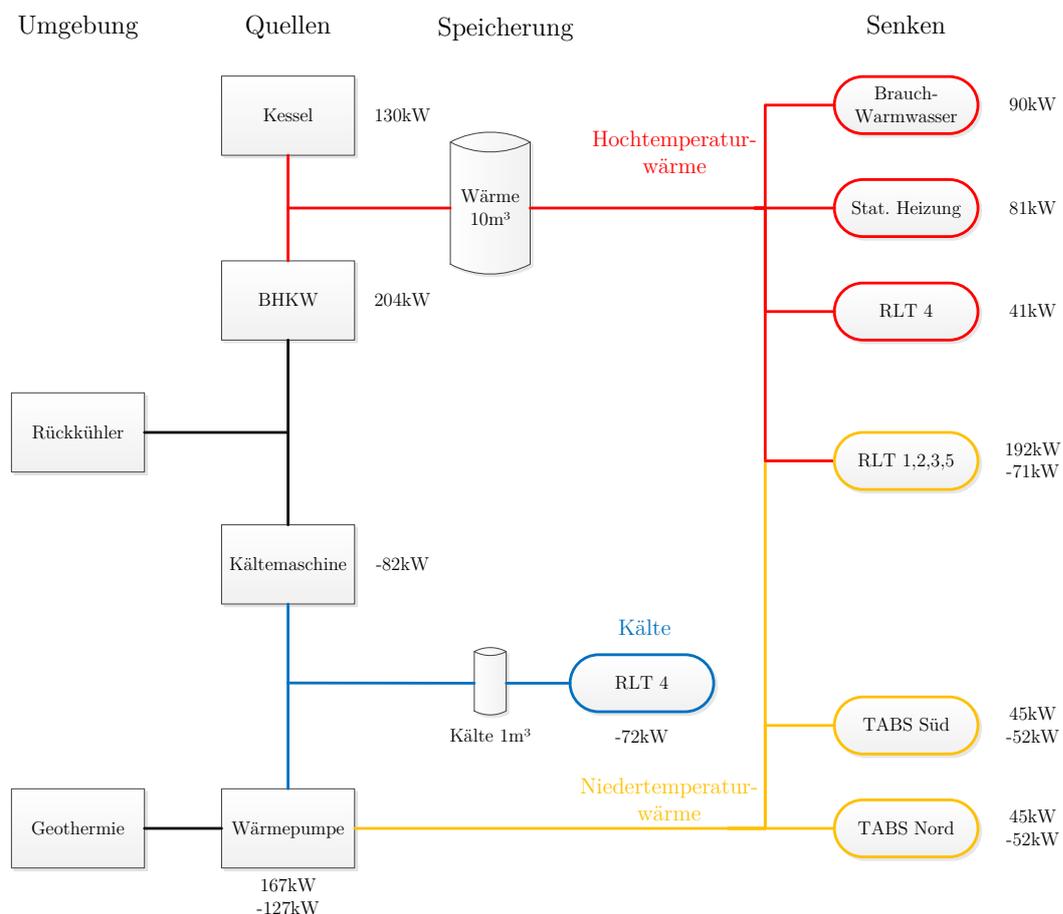


Abbildung 3.1: Energiekonzept KPBM Mettmann – vereinfachte Übersicht der anlagentechnischen Komponenten [28]

Die RLT-Anlagen 1, 2, 3 und 5 werden im Heizfall über das Hochtemperaturnetz, bei Kühlbedarf jedoch über das Niedertemperaturnetz versorgt. Es existiert eine weitere Verbindung dieser beiden Systeme zur redundanten Versorgung des Niedertem-

peratorsystems im Heizfall bei nicht ausreichender Heizleistung der Wärmepumpe oder deren Ausfall. Diese Verbindung wird hier nicht dargestellt. Der Wärmebedarf der Hochtemperatursenken kann durch den thermischen Speicher zeitlich von den zwei Hochtemperaturquellen Kessel und Blockheizkraftwerk entkoppelt werden. Die RLT 4 zur Versorgung der Leitstelle wird bei Heizbedarf mit Hochtemperaturwärme, im Kühlfall mit Kälte aus einem Pufferspeicher versorgt. Dieser wiederum wird von einer Kältemaschine bzw. der Wärmepumpe beladen. Die Wärmepumpe nutzt 101 Bohrpfähle bei einer gesamten maximalen Heiz- bzw. Kühlleistung von 115 kW als Umgebungswärmequelle und -senke.

**Flächenheizung mit TABS:** Die Konditionierung der Büroflächen erfolgt über Flächenheizsysteme. Dabei kommen thermisch aktivierte Bauteilsysteme (TABS) und Seitenstreifenelemente zum Einsatz, die für Heiz- und Kühlzwecke verwendet werden können. Die TABS sind im Betonkern eingegossen und reagieren aufgrund der niedrigen Wärmeleitfähigkeit und der hohen Speicherkapazität des Betons sehr träge. Die Seitenstreifen werden direkt unter der Oberfläche des Bodens verlegt. Ihre spezifische Wärmeleistung ist höher und es kommt zu höhere Oberflächentemperaturen. Das Bürogebäude wurde nicht mit einem außenliegenden Sonnenschutz versehen. Kommt es zu einer plötzlichen Änderung der internen Wärmegewinne oder der Solarstrahlung auf die Fassade, kann das Heiz- bzw. Kühlsystem nicht schnell genug reagieren. Abbildung 3.2 zeigt eine Auswertung gemessener Raumlufttemperaturen der Führungsräume der Kreispolizeibehörde. Die Auswertung der Temperaturen nach DIN EN 15251 zeigt, dass speziell in der Westzone kein komfortables Raumklima herrscht. So kann zu über 25% der genutzten Zeit kein für neue und renovierte Gebäude empfohlenes Maß an thermischem Komfort geboten werden.

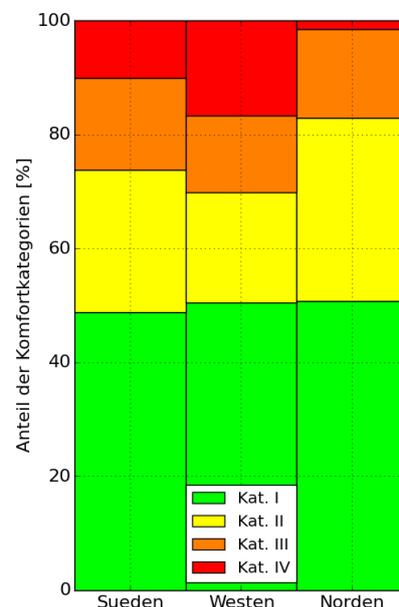


Abbildung 3.2: Häufigkeit von erreichten Kategorien nach DIN EN 15251 der gemessenen Lufttemperaturen aller Referenzräume der KPBM [28]

### 3.2.4 Modellbildung

In diesem Kapitel werden die Randbedingungen der durchgeführten Simulationen beschrieben. Dabei wird sowohl auf die technischen Eigenschaften der Anlage als auch auf rechnerische Umsetzung im Simulationsprogramm eingegangen. Alle Simulationen wurden mit der objektorientierten Programmiersprache MODELICA<sup>®</sup>, Version 3.3 sowie der graphischen Oberfläche DYMOLA<sup>®</sup>, Version 2015 FD01 (64-Bit) durchgeführt. Es wurden die Bibliotheken Modelica Standard Library [29] in der Version 3.2.1, die Buildings Library [38] in der Version 2.0.0, die Fault Triggering Library [22] in der Version 0.6.0 sowie die Fraunhofer ISE interne Bibliothek ISELib, Version 5 verwendet.

Für die Erstellung von nominalen Simulationsmodelle wurde die Wärmeversorgung in zwei Subsysteme gegliedert. Das Niedertemperatur-Wärmesystem wird von einer Wärmepumpe (WP) versorgt und gibt Wärme bei Temperaturen von  $25\text{--}35\text{ }^{\circ}\text{C}$  an TABS ab. Dieses System kann im Sommer in einem Modus freier geothermischer Kühlung bei Vorlauftemperaturen um  $18\text{ }^{\circ}\text{C}$  betrieben werden. In diesem Fall können die RLT-Anlagen Nr. 1, 2, 3 und 5 über das Niedertemperatur-Netz (NT-Netz) betrieben werden.

Das Hochtemperaturwärmesystem bezieht seine Wärme bei Temperaturen um  $90\text{ }^{\circ}\text{C}$  von einem gasbetriebenen Blockheizkraftwerk (BHKW) sowie von einem Gaskessel. Die beiden Wärmequellen sind mit einem Wärmespeicher verbunden. Drei Heizkreise (HK) beziehen ihren Wärmebedarf ausschließlich aus dem Hochtemperatur-Netz (HT-Netz) über einen Anschluss an den Wärmespeicher. Außerdem werden die RLT-Anlagen Nr. 1, 2, 3 und 5 im Heizbetrieb an das HT-Netz zugeschaltet. Kommt es zu einem Ausfall der Wärmepumpe oder übersteigt der Wärmebedarf des NT-Netzes die maximale Heizleistung der Wärmepumpe, so kann das NT-Netz an das HT-Netz gekoppelt werden.

**3.2.4.1 Hochtemperaturwärme-Kreislauf** Im Folgenden werden alle relevanten Randbedingungen des Hochtemperatursimulationsmodells beschrieben. Abbildung 3.3 zeigt schematisch alle implementierten Rohrleitungen sowie die wichtigsten Bauteile. Das Hochtemperatur-Wärmesystem wird bei Temperaturen um  $90\text{ }^{\circ}\text{C}$  von einem gasbetriebenen Blockheizkraftwerk (BHKW) sowie von einem Gaskessel versorgt. Letzterer wird lediglich hinzu geschaltet, wenn das BHKW die geforderte Wärmelast nicht alleine decken kann oder sich in Revision befindet. BHKW und Kessel sind mit einem  $10\text{ m}^3$  Heizungswasser fassenden Wärmespeicher verbunden. Dieser dient als thermische Weiche und damit zur hydraulischen Entkoppelung von Quellen und Senken.

Heizkreis 1 dient der Erwärmung von Brauchwarmwasser (BWW). Dabei wird der Vorlauf ohne Regelung der Temperatur zum Wärmeübertrager geführt. Im zweiten Heizkreis wird die Vorlauftemperatur des Fluids mittels einer Beimischschaltung auf einen gewünschten Sollwert geregelt und anschließend der statischen Heizung bei einer Nenn-Temperaturspreizung von  $70/50\text{ }^{\circ}\text{C}$  zugeführt. Heizkreis 3 besitzt wie HK2 eine Beimischschaltung zur Regelung der Vorlauftemperatur bei einer Auslegungstemperatur  $T_{Vl,HT,HK3} = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Als Verbraucher treten drei Luft/Wasser -Wärmeübertrager zur Konditionierung von Raumluft auf. Diese werden zu einer Wärmesenke RLT 4 zusammengefasst.

Die RLT-Anlagen Nr. 1, 2, 3 und 5 sind Bestandteil von Heizkreis 4. Sie werden nicht vom Kompaktverteiler, sondern über eine separate Rohrleitung versorgt. Wie in Ab-

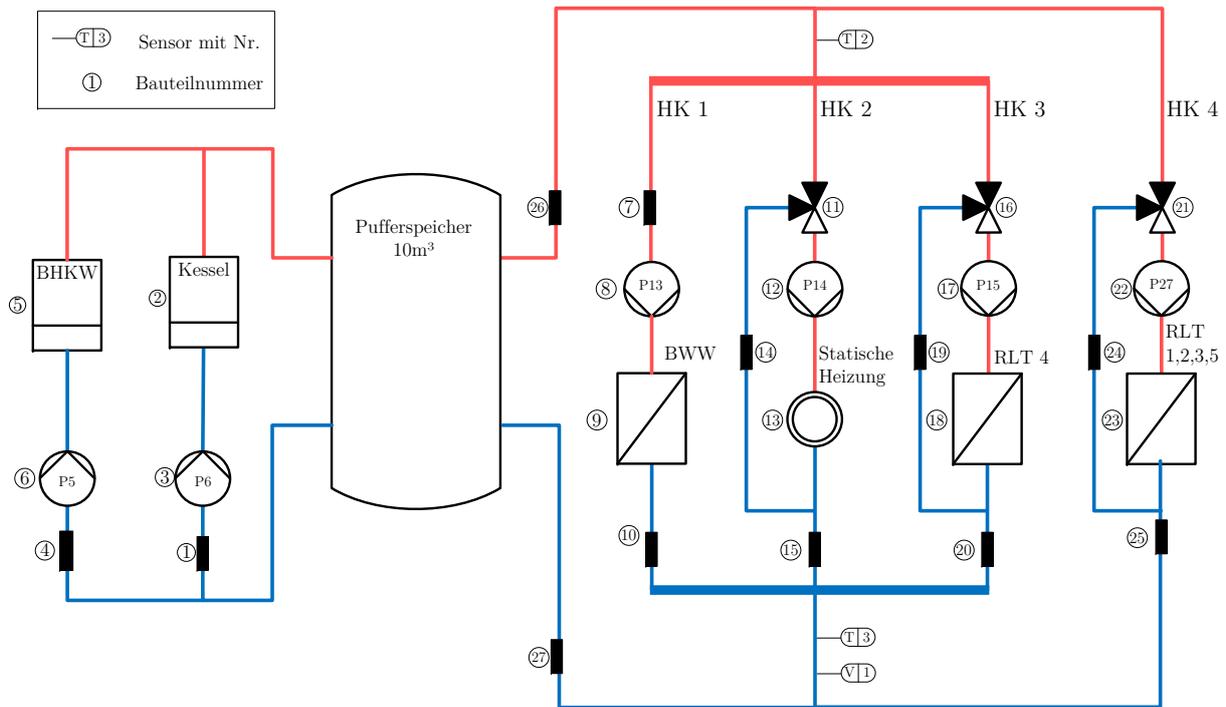


Abbildung 3.3: Prinzipschema des Hochtemperatur-Kreislaufs [28]

Abbildung 4 zu erkennen ist, existiert hier ebenfalls ein Mischventil zur Regelung der HK-Vorlauftemperatur auf eine Auslegungstemperatur von  $35^{\circ}\text{C}$ .

Dem Simulationsmodell der HT-Wärmeversorgung liegen einige Vereinfachungen und Annahmen zugrunde, welche im Folgenden genannt werden:

- Ein Heizkreis zur Versorgung einer Fußbodenheizung mit 6kW Nennleistung bei einer Auslegungstemperaturspannung von  $35/30^{\circ}\text{C}$  wurde nicht implementiert, da seine Leistung lediglich 1.5% der gesamten installierten Verbraucher-Leistung des Hochtemperatur-Wärmekreislaufs beträgt.
- Die RLT-Anlagen 1, 2, 3 und 5 werden zusammengefasst als eine Wärmesenke betrachtet.
- Die Raumlufttechnik-Anlage 4, bestehend aus zwei Vor- und einem Nacherhitzer, wird ebenfalls als eine Komponente abgebildet.
- Der redundante Betrieb wird nicht berücksichtigt.
- Die RLT-Anlagen 1, 2, 3 und 5 werden ausschließlich vom HT-Kreis 2 versorgt, es wird kein Kühlbetrieb durch den NT-Kreis betrachtet.
- Komponenten wie kurze Rohrstücke, Strangreguliertventile, Absperrklappen usw., welche im realen hydraulischen System verbaut sind, werden im Simulationsmodell nicht berücksichtigt, da ihre Abbildung keinen Mehrwert für die Simulation erbrächte.

Abbildung 3.4 zeigt die visuelle Oberfläche zur Modellierung des Hochtemperatur-Systems in DYMOLA®. Dabei wird der modulare Aufbau des Modells sichtbar. In den

folgenden Absätzen werden die wichtigsten Module des HT-Modells und deren Randbedingungen beschrieben.

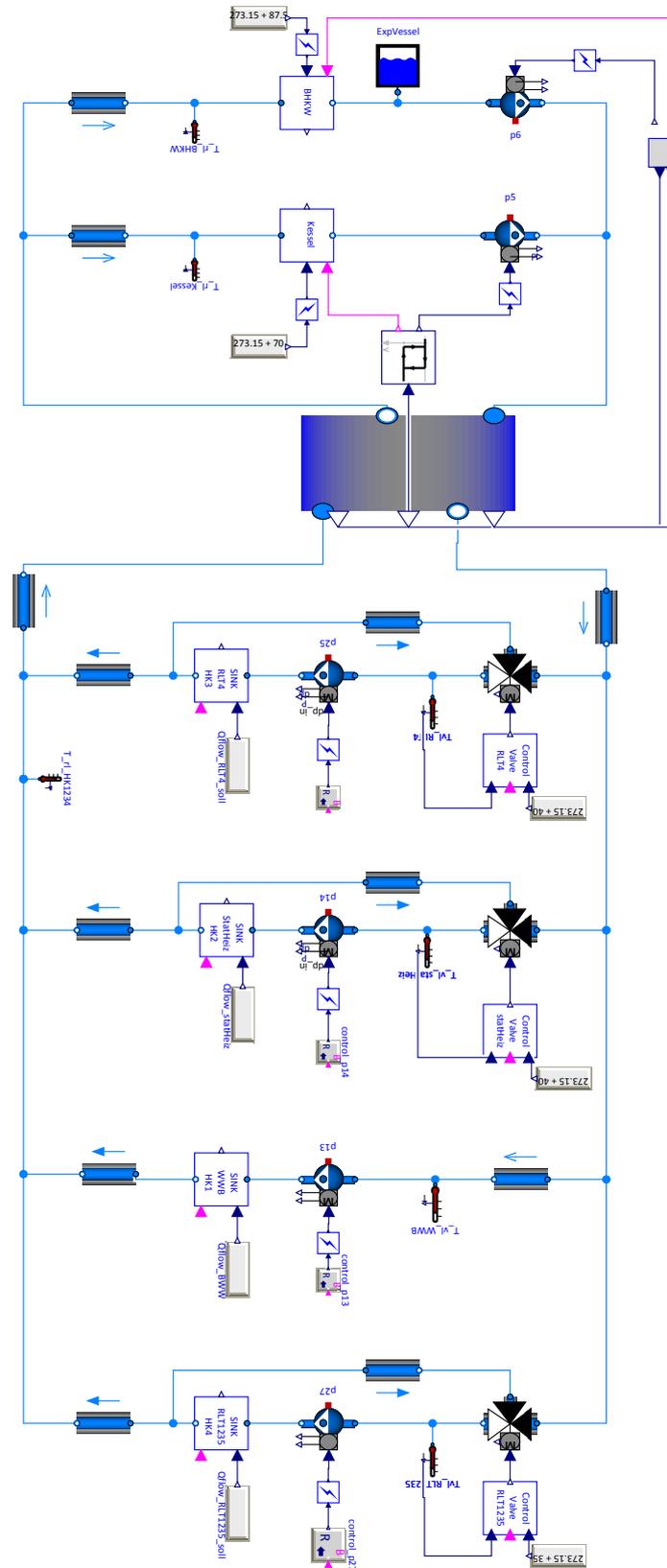


Abbildung 3.4: Systemskizze Modellierung Hochtemperatur-Kreislauf in Dymola [28]

**Blockheizkraftwerk:** Im Gebäude ist ein gasbetriebenes, wärmegeführtes BHKW mit

einer variablen thermischen Leistung  $\dot{Q}_{BHKW} = 102 - 204 \text{ kW}_{th}$  verbaut. Es wird mit einer Nenn-Vorlauftemperatur  $T_{VL,BHKW,n} = 90^\circ\text{C}$  bei einer Temperaturspreizung von  $20 \text{ K}$  betrieben. Die Abbildung des Wärmereizers erfolgt mithilfe eines Modells für eine idealisierte Wärmezufuhr. Ein PI-Regler definiert dabei für jeden Zeitschritt den benötigten Wärmestrom, welcher dem Fluid zugeführt wird, um die gewünschte Vorlauftemperatur zu erzielen. Die Regelgröße des PI-Reglers ist die nach der Wärmezufuhr in der Komponente gemessene Vorlauftemperatur. Als Führungsgröße wird eine konstante Temperatur  $T_{VL,BHKW,soll} = 90^\circ\text{C}$  definiert. Ein boolesches Eingangssignal gibt an, ob die Regelung aktiv ist. Dieses Signal dient auch zur An/Aus-Regelung der Pumpe P6, welche für eine Zirkulation des Fluids durch das BHKW sorgt. Die Kriterien zur Regelung dieses Signals werden im Abschnitt Pufferspeicher beschrieben.

Abbildung 3.5 zeigt den Verlauf von Sollwert, Istwert und Regelgröße für einen exemplarischen Zeitraum von sechs Stunden am 14.01.2015. Da die Simulation am 14.01.2015 um 00:00 Uhr beginnt, kommt es bis 01:30 Uhr zu einer Aufheizungsphase des Speichers. Es wird deutlich, dass die Regelwert dem Führungswert bei Wärmeströmen von  $190 - 204 \text{ kW}$  gut folgen kann. Außerdem kann ein taktender Betrieb mit Heizperioden von  $10 - 30 \text{ min}$  festgestellt werden.

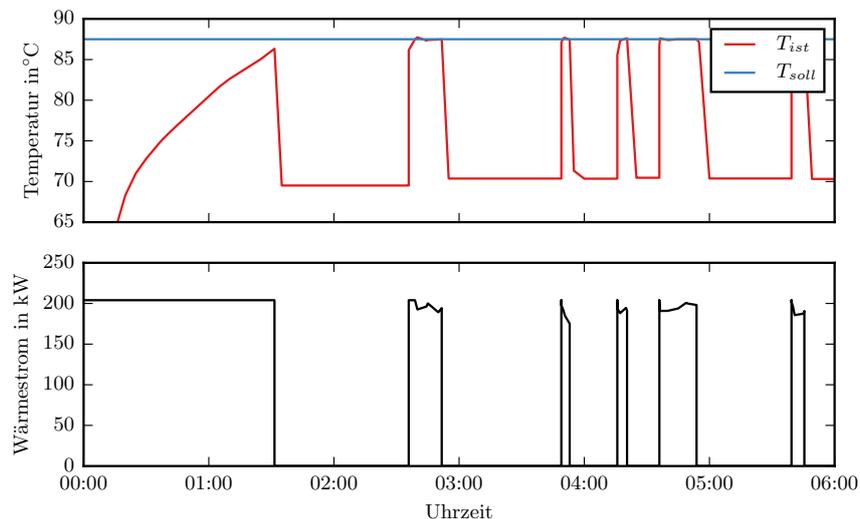


Abbildung 3.5: Regelung BHKW - Vorlauftemperatur und Wärmestrom [28]

**Gaskessel:** Zur Unterstützung des Blockheizkraftwerks bei Spitzenlasten und als redundante Wärmequelle bei einem eventuellen Ausfall des BHKW wurde ein Gaskessel installiert. Dieser ist hydraulisch mit dem BHKW parallelgeschaltet und mit dem Speicher verbunden. Der Kessel hat eine thermischen Leistung  $\dot{Q}_{K,n} = 130 \text{ kW}_{th}$ . Es wird ebenfalls mit einer Nenn-Vorlauftemperatur  $T_{VL,K,n} = 90^\circ\text{C}$  bei einer Temperaturspreizung von  $20 \text{ K}$  betrieben. Die Abbildung des Kessels erfolgt ebenfalls mithilfe des Modells für eine idealisierte Wärmezufuhr.

**Umwälzpumpen Erzeuger P5 und P6:** Die beiden Umwälzpumpen der Wärmereizerkreise P5 und P6 werden als ideal Massenstrom fördernde Pumpen mithilfe des Modells `Buildings.Fluid.Movers.FlowControlled_m_flow` aus der Buildings-Library modelliert. Ein idealer Massenstrom erscheint als plausible Annahme, da sich der Druckverlust über die Zeit in diesen beiden hydraulischen Kreisen nur geringfügig ändert. Im Gegensatz zu den hydraulischen Kreisen der Wärmesenken sind hier keine Drossel- oder Mischventile verbaut, welche zu variablen Druckverlusten führen. Die

beiden Pumpen werden jeweils über ein Signal an- und ausgeschaltet, welches abhängig von den Temperaturen des Speichers Oben, in der Mitte und Unten, einen Wahrheitswert annimmt und erzeugen bei Pumpbetrieb konstante Massenströme.

**Pufferspeicher:** Der Pufferspeicher des Hochtemperaturwärme-Netzes dient zur hydraulischen Entkoppelung von Wärmequellen und -senken. Es liegen keine detaillierten Informationen zum Teillastverhalten des BHKW vor. Es ist jedoch bekannt, dass es eine minimale Wärmeleistung von 50% der Nennleistung aufweist. Um Leistungsbereiche unterhalb dieser Grenze von 102 kW abdecken zu können, ist ein Pufferspeicher nötig. Somit können sowohl das BHKW als auch der Gaskessel mit taktender Zwei-Punkt-Regelung betrieben werden. Der Wärmespeicher wird mithilfe eines am Fraunhofer ISE entwickelten Modells für einen Fluidspeicher berechnet. Dieses bildet vier Anschlüsse, eine feste Anzahl von Fluidschichten bzw. thermischen Knoten, Wärmeleitung zwischen diesen Schichten, Wärmeverluste an die Umgebung und Wärmeaustausch der Schichten durch Auftrieb bei Dichteunterschieden ab. Die Regelung zur Freigabe von BHKW und Kessel erfolgt laut Funktionsbeschreibung folgendermaßen: „Das BHKW wird freigegeben, wenn der ausgewählte Speichertemperaturfühler (oben oder Mitte, auswählbar) kleiner bzw. gleich dem eingestellten Speichersollwert minus der Einschalt Differenz ist. Abgeschaltet wird das BHKW, wenn der Speicherfühler unten größer bzw. gleich dem Ausschalt Sollwert plus der Ausschalt Differenz ist. Der Gaskessel dient zur Unterstützung des BHKWs in Spitzenlastzeiten oder bei einer Störung des BHKWs. Der Kessel wird über einen einstellbaren Sollwert des mittleren Temperaturfühlers des Speichers und einer einstellbaren Schalthysterese mit Verzögerungszeit geschaltet. Dann wird auch die Kesselpumpe P5 mit einer einstellbaren Nachlaufzeit freigegeben“. Da diese Beschreibung keine Angaben zu konkreten Temperaturen enthält, wurde anhand der vorliegenden Messwerte zu Speichertemperaturen und Volumenströmen eruiert, mit welchen Grenzwerten die Regelung der Wärmeerzeuger erfolgt. An dieser Stelle soll erwähnt werden, dass keine Angaben zu den Positionen der Temperaturfühler vorliegen. Die Höhe und Art der Ein- und Auslässe des Pufferspeichers ist ebenso wenig bekannt.

Abbildung 3.6 veranschaulicht die Abhängigkeit des Volumenstroms  $\dot{V}_{BHKW}$  von der oberen und unteren Speichertemperatur.

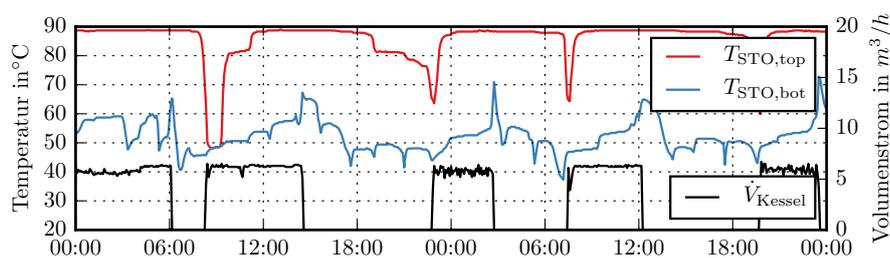


Abbildung 3.6: Ein- und Ausschaltverhalten des Blockheiz-Kraftwerks; Zeitraum: 12.01. – 14.01.2015 [28]

Aus dem Diagramm kann abgelesen werden, dass das BHKW bei einer Speichertemperatur Oben kleiner  $70\text{ }^{\circ}\text{C}$  den Betrieb aufnimmt und bei einer Speichertemperatur Unten größer  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$  ausgeschaltet wird. Die Implementierung der Regeln zur Beladung des Speichers durch das BHKW erfolgt mithilfe eines selbst erstellten Regelalgorithmus nach dem Prinzip der sogenannten RSFlipflop-Schaltung. Dabei „nimmt der Ausgang  $Q$  den Signalzustand 1 an, wenn der Setzeingang  $S$  kurzzeitig ein 1-Signal führt.

Der 1-Zustand am Ausgang  $Q$  wird solange gespeichert, bis an den Eingang  $R$  ein 1-Signal angelegt wird“.

Zur Bestimmung der Grenzwert-Temperatur für den Betrieb des Gaskessels wurde die mittlere Speichertemperatur  $T_{STO,mid}$  sowie der Volumenstrom durch den Kessel-Kreis für den Zeitraum 10.02. – 12.02.2015 betrachtet (siehe Abbildung 3.7).

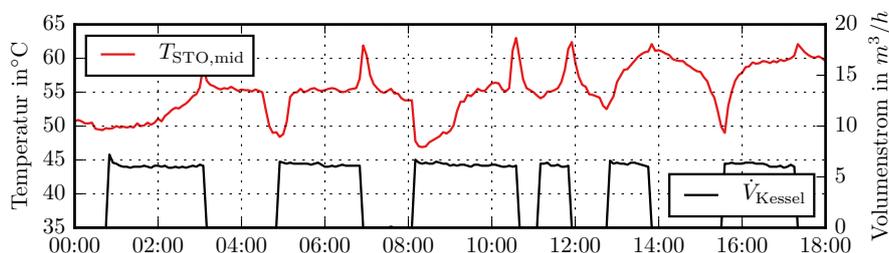


Abbildung 3.7: Ein- und Ausschaltverhalten Spitzenlastkessel für den 11.02.2015 [28]

Es wird deutlich, dass der Kessel bei einer Speichertemperatur am mittleren Temperatursensor kleiner  $50^\circ\text{C}$  den Betrieb aufnimmt und bei einer Temperatur größer  $60^\circ\text{C}$  ausgeschaltet wird. Die Beladung des Speichers über den Kessel wird mittels eines Hysterese-Reglers realisiert. Dabei dient die Temperatur  $T_{STO,mid}$  als Eingangsgröße. Der untere Grenzwert  $u_{Low}$  wird mit  $50^\circ\text{C}$ , der obere Grenzwert  $u_{High}$  mit  $60^\circ\text{C}$  festgelegt. Das boolesche Ausgangssignal muss anschließend invertiert werden, um das gewünschte Signal zu erhalten.

**Wärmesenke 1 - Brauchwarmwasserbereitung:** Heizkreis 1 des Hochtemperatur-Systems versorgt einen  $0,75\text{ m}^3$  fassenden Frischwasserspeicher mit Wärme, um Brauchwarmwasser bei einer Temperatur von  $65^\circ\text{C}$  zur Verfügung stellen zu können. Die stoffliche Trennung zwischen Heiz- und Brauchwasser wird durch einen Wärmeübertrager (WÜ) realisiert. Pumpe 13 sorgt auf Anforderung für eine Durchströmung des Systems auf der Heizungswasser-Seite. Eine Freigabe der primär- und sekundärseitigen Pumpen zur Beladung des Speichers erfolgt bei Unterschreiten des Sollwerts am Speicher-Temperatursensor. Laut Revisionszeichnung ist bei einer Temperaturpaarung von  $90/70^\circ\text{C}$  eine Auslegungsleistung von  $90\text{ kW}$  vorgesehen. Die Abbildung des Systems erfolgt durch das vereinfachte Modell Wärmestrom geregelte reale Wärmeübergabe, bei welchem die Systemgrenze zwischen primärer und sekundärer Seite im WÜ liegt. Dabei wird keine Massenstromregelung oder Regelung der Rücklauftemperatur vorgenommen. Die Temperaturdifferenz zwischen Vor- und Rücklauf stellt sich abhängig von der zu entnehmenden Wärmemenge frei ein. Um die Wärmesenken des Hochtemperatur-Systems vereinfacht abbilden zu können, wurde ein Ansatz gewählt, bei dem die Charakteristik der Senken anhand durch Messungen definierte Größen abbildbar ist. Dafür wurde der an jeder Senke entnommene Wärmestrom für den Zeitraum 05.01. – 25.06.2015 gemessen. Zwar weisen die Heizkreise 1 bis 3 jeweils Temperatursensoren für Vor- und Rücklauf auf, leider werden hier jedoch keine Daten zur Durchströmung erfasst. Stellsignale von Pumpen oder Ventilen können an dieser Stelle nicht verwendet werden, um zufriedenstellende quantitative Aussagen zu Volumen oder Massenströmen treffen zu können. Aus diesem Grund wurden die Sensoren am Heizkreis-Verteiler verwendet, um den Wärmestrom  $\dot{Q}_{HKV,HT}$  an den Heizkreisen 1 bis 3 mit Gleichung (3.1) zu berechnen.

$$\dot{Q}_{HKV,HT} = \dot{V}_{HKV,HT} \cdot \rho_{H_2O} \cdot c_{H_2O} \cdot (T_{VI,HKV,HT} - T_{RI,HKV,HT}) \quad (3.1)$$

Dieser Wärmestrom wird mithilfe der Gleichungen 3.2 bis 3.4 anteilig den drei Heizkreisen zugeteilt.  $\dot{Q}_{HT,HK1}$  berechnet sich demnach aus der Differenz vom Wärmestrom des HKV abzüglich der Wärmeströme der Heizkreise 2 und 3.  $\dot{Q}_{HT,HK2}$  und  $\dot{Q}_{HT,HK3}$  werden berechnet, indem der gesamte Wärmestrom des Verteilers mit einem Gewichtungsfaktor entsprechend der installierten Nennleistungen und einem weiteren Gewichtungsfaktor, welcher eine Funktion der über 24h gemittelten Außentemperatur  $T_{amb,24h}$  ist, multipliziert wird.

$$\dot{Q}_{HT,HK1} = \dot{Q}_{HT,HKV} - \dot{Q}_{HT,HK2} - \dot{Q}_{HT,HK3} \quad (3.2)$$

$$\dot{Q}_{HT,HK2} = \dot{Q}_{HT,HKV} \cdot \frac{\dot{Q}_{HT,HK2,n}}{\dot{Q}_{HT,HKV,n}} \cdot f_{HK2}(T_{amb,24h}) \quad (3.3)$$

$$\dot{Q}_{HT,HK3} = \dot{Q}_{HT,HKV} \cdot \frac{\dot{Q}_{HT,HK3,n}}{\dot{Q}_{HT,HKV,n}} \cdot f_{HK3}(T_{amb,24h}) \quad (3.4)$$

mit:

- $\dot{Q}_{HT,HKV}$  : Wärmestrom HT Heizkreisverteiler
- $\dot{Q}_{HT,HK1}$  : Wärmestrom HT Heizkreis 1
- $\dot{Q}_{HT,HK2}$  : Wärmestrom HT Heizkreis 2
- $\dot{Q}_{HT,HK3}$  : Wärmestrom HT Heizkreis 3
- $\dot{Q}_{HT,HK2,n}$  : Auslegungswärmestrom HT Heizkreis 1
- $\dot{Q}_{HT,HK3,n}$  : Auslegungswärmestrom HT Heizkreis 2
- $\dot{Q}_{HT,HKV,n}$  : Auslegungswärmestrom HT Heizkreis 3
- $f_{HK2}(T_{amb,24h})$  : Außentemperaturabhängiger Gewichtungsfaktor HK2
- $f_{HK3}(T_{amb,24h})$  : Außentemperaturabhängiger Gewichtungsfaktor HK3
- $T_{amb,24h}$  : Mittelwert der Umgebungstemperatur über 24h

$$f_{HK2}(T_{amb,24h}) = \begin{cases} 1 & : T_{amb,24h} < -10 \\ -\frac{T_{amb,24h}}{22} + \frac{6}{11} & : -10 < T_{amb,24h} < 12 \\ 0 & : T_{amb,24h} \geq 12 \end{cases} \quad (3.5)$$

$$f_{HK3}(T_{amb,24h}) = \begin{cases} 1 & : T_{amb,24h} < -10 \\ -\frac{T_{amb,24h}}{25} + \frac{3}{5} & : -10 < T_{amb,24h} < 15 \\ 0 & : T_{amb,24h} \geq 15 \end{cases} \quad (3.6)$$

Abbildung 3.8 zeigt den Verlauf des Wärmebedarfs, wie er mit den oben genannten Gleichungen berechnet wurde. Es wird deutlich, dass der Wärmestrom am Heizverteiler  $\dot{Q}_{HT,HKV}$  saisonal stark schwankt und sich von Winter zu Sommer etwa halbiert. Der errechnete Verbrauch von Wärme zur Warmwasser-Konditionierung sinkt hingegen nur leicht. Die Lücken in den Monaten Februar und Juni begründen sich durch Ausfälle bei der Datenerfassung.

**Wärmesenke 2 – statische Heizung:** Die statische Heizung weist eine Vorlauftemperatur geregelte Beimischung des Rücklauf-Massenstroms auf. Somit kann eine Temperaturpaarung von 70/50°C und ein Wärmestrom  $\dot{Q}_{HT,HK2,n} = 81 \text{ kW}$  im Auslegungszustand erzielt werden. Pumpe 14 sorgt für eine Durchströmung des Heizkreises abhängig von einem außentemperaturgeführten booleschen Signal, sodass bei  $T_{amb,24h} > 12^\circ\text{C}$  die Pumpe ausgeschaltet wird. Die Wärmeentnahme durch die statische Heizung wird mithilfe des Modells Wärmestrom geregelte Massenstromdrosselung mit realer Wärmeübergabe abgebildet. Damit kann die Dynamik einer statischen

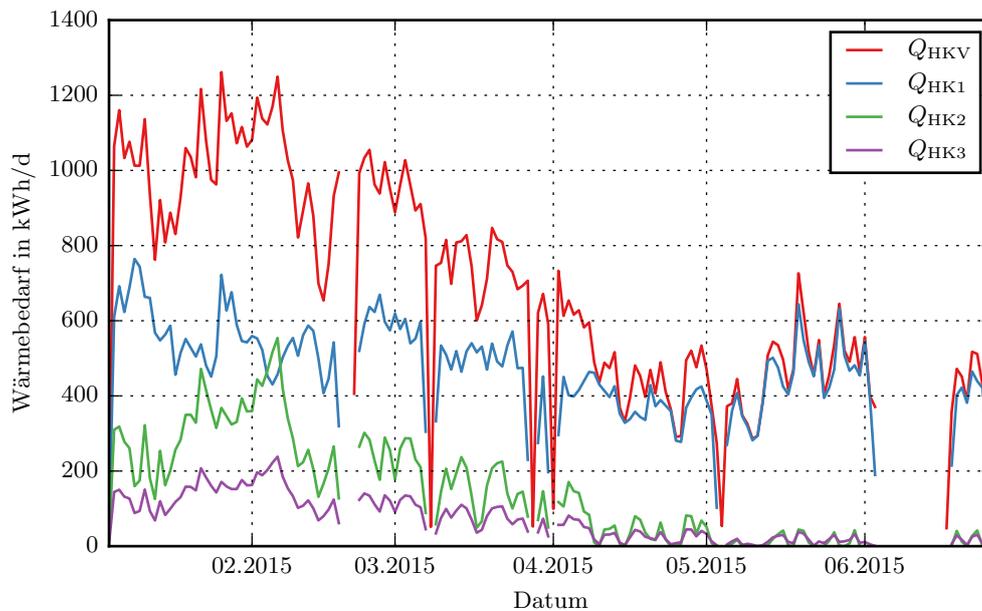


Abbildung 3.8: Täglicher Wärmebedarf der HT-Heizkreise 1 bis 3 [28]

Heizung abgebildet werden, da der Wärmebedarf über eine Massenstrom-Drosselung geregelt wird. Das boolesche Signal, welches die Pumpe steuert, wird auch an dieses Modul übergeben, um es bei ausbleibendem Massenstrom abzuschalten. Zusätzlich wird der Wärmebedarf  $Q_{HT, HK2}$  an das Modell übergeben. Dieses drosselt den Massenstrom mithilfe des Zwei-Wege-Ventils entsprechend, um die geforderte Wärmemenge über den Wärmeübertrager an die Umgebung abgeben zu können. Es wurde eine konstante Temperatur von  $23^\circ\text{C}$  für die sekundäre Seite des Wärmeübertragers gewählt, was einer konstanten Raumlufttemperatur in dieser Höhe in den Räumen mit statischer Heizung entspricht.

**Wärmesenke 3 - RLT-Anlage 4:** der Heizkreis 4 weist ebenfalls eine Vorlauftemperatur geregelte Beimischung des Rücklauf-Massenstroms auf. Dadurch kann eine Vorlauftemperatur  $T_{VI, HT, HK3, n} = 40^\circ\text{C}$  bei einer Temperaturdifferenz zwischen Vor- und Rücklauf von  $10\text{ K}$  erzielt werden. Der Vorlauf von HK3 versorgt die RLT-Anlage 4, welche aus den drei Wärmeübertragern Vorerhitzer ( $\dot{Q}_n = 19\text{ kW}$ ), Nacherhitzer Leitstelle ( $\dot{Q}_n = 14\text{ kW}$ ) und Nacherhitzer Führung ( $\dot{Q}_n = 8\text{ kW}$ ) besteht. Die Anlage wird jedoch als ein Wärmeübertrager mit einer Leistung ( $\dot{Q}_{HT, HK3, n} = 41\text{ kW}$ ) abgebildet. Es wird das Modell Wärmestrom geregelte reale Wärmeübergabe verwendet. Der PI-Regler des Modells regelt die Temperatur auf der sekundären Seite des Wärmeübertragers entsprechend des vorgegebenen Wärmestroms in den Grenzen von  $1 - 98^\circ\text{C}$ .

**Wärmesenke 4 - RLT-Anlagen 1, 2, 3 und 5:** Die RLT-Anlagen 1, 2, 3 und 5 werden nicht wie die restlichen Wärmesenken über denselben Heizkreis-Verteiler versorgt, sondern über eine separate Leitung an den Pufferspeicher angebunden. Ein Dreiwege-Ventil sorgt dabei laut Revisionsplanung für eine Absenkung der Vorlauftemperatur durch Rücklaufbeimischung von  $90^\circ\text{C}$  auf  $35^\circ\text{C}$ . Im Heizbetrieb kommen alle Anlagen gemeinsam auf eine Auslegungswärmeleistung  $\dot{Q}_{HT, HK4, n} = 191,7\text{ kW}$ . Sie werden identisch zu Wärmesenke 3 - RLT-Anlage 4 als eine Komponente mit demselben Modell abgebildet. Der als Eingangsgröße in das Modell zu definierende Wärmestrom wird aus Messwerten generiert. Er berechnet sich mit Gleichung (3.7) mithilfe des gemessenen Volumenstroms  $\dot{V}_{HT, HK4}$  sowie der Temperaturen  $T_{VI, HT, HK4}$  und  $T_{RI, HT, HK4}$  welche am

Vor- und Rücklauf der Zuleitung für HK4 erhoben werden.

$$\dot{Q}_{HT, HK4} = \dot{V}_{HT, HK4} \cdot \rho_{H_2O} \cdot c_{H_2O} \cdot (T_{VI, HT, HK4} - T_{RI, HT, HK4}) \quad (3.7)$$

Der Verlauf von  $\dot{Q}_{HT, HK4}$  kann Abbildung 3.9 entnommen werden. Für eine bessere Darstellbarkeit wurden stündliche Mittelwerte der Wärmeleistung gebildet (oben). Selbst mit dieser Glättung der Messwerte ist eine hohe Fluktuation über den gesamten Zeitraum (oben) erkennbar. Die Darstellung des nicht gemittelten Wärmestroms unten zeigt für den 16.01.2015 realistische Werte im Bereich 0~170 kW auf. Am 17.01. kommt es zu einzelnen Leistungsspitzen bis 1000 kW, welche auf eine fehlerhafte Messwerterfassung des Volumenstromsensors zurückgeführt werden. Um diese extremen Werte zu korrigieren, wird die maximale Wärmeleistung auf 200 kW begrenzt. Außerdem wird ein PT1-Glied verwendet, um das nicht differenzierbare Messwert-Signal zu glätten und linear approximieren zu können. Pumpe 27, der PI-Regler für Stellung des Dreiwege-Ventils sowie der PI-Regler der Wärmesenke werden durch ein boolesches Signal an- und ausgeschaltet. Dieses wird falsch, sobald die über 24 h gemittelte Außentemperatur  $T_{amb, 24h} > 15^\circ$  oder falls Heizkreis 4 über den Niedertemperatur-Wärmekreis versorgt wird. Als Indikatoren dafür dienen die aus der realen Gebäudeleittechnik (GLT) entnommenen Signale zur Steuerung von Pumpe P27 sowie der Absperrventile im Vor- und Rücklauf der Versorgungsleitung von HT-Speicher zu HK4. Nimmt eines dieser Signale den Wert Falsch an, werden die Pumpe sowie die beiden Regler ausgeschaltet. Dann wird durch HK4 keine Wärme aus dem System abgeführt.

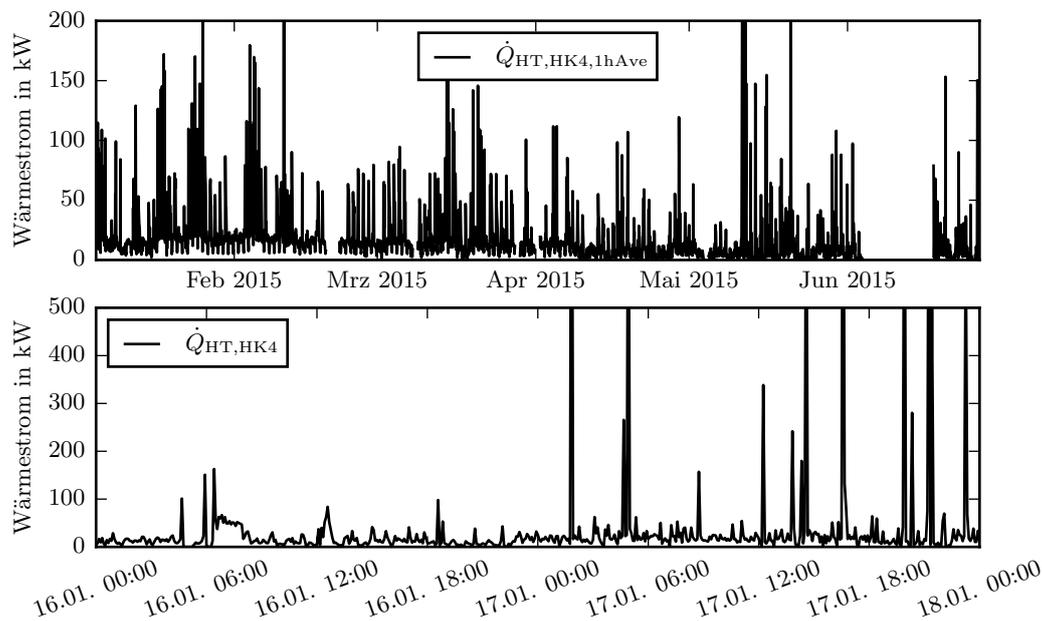


Abbildung 3.9: Verlauf stündlich gemittelter Wärmestrom an Heizkreis 4 [28]

**Umwälzpumpen Verbraucher P13, P14, P25 und P27:** Die Umwälzpumpen der Heizkreise P13, P14, P25 und P27 werden als Pumpen mit idealer Druckdifferenz mittels des Modells `Buildings.Fluid.Movers.FlowControlled_dp` aus der `Buildings-Library` abgebildet. Die Regelung der Pumpen wird als ideale Regelung der Druckdifferenz realisiert. Im Gegensatz zu den hydraulischen Kreisen der Wärmequellen sind hier Drossel- oder Mischventile verbaut, welche zu variablen Druckverlusten und unterschiedlichen Massenströmen führen. Auswertungen der Volumenströme ergeben eine

hohe Streuung der auftretenden Werte. Das Pumpsignal von HK2 wird auch bei komplett geschlossenem Ventil und  $\dot{m} = 0$  nicht auf Null gesetzt, da Pumpe 14 ihre Leistung automatisch reduziert. Die Signale des realen Gebäudes bestätigen diese Regelung. Dort nimmt das Signal zur Ansteuerung von Pumpe 14 lediglich bei einer kompletten Abschaltung im Sommer bei hohen Außentemperaturen den Wert Falsch an.

**Mischventile der Heizkreise 2, 3 und 4:** Die drei Heizkreise mit Regelung der Vorlauf-temperatur weisen jeweils ein Dreiwege-Ventil zur Beimischung von Heizwasser des Rücklaufs auf. Es liegen keine näheren Informationen zu Bauart, Hersteller oder Modell vor. Der Revisionszeichnung können die  $k_{vs}$ -Werte der Ventile entnommen werden ( $k_{vs,Vent.HK2} = 16$ ;  $k_{vs,Vent.HK3} = 25$ ;  $k_{vs,Vent.HK4} = 160$ ). Alle drei Ventile werden mithilfe des Modells Mischventil abgebildet.

**Massenströme und Druckverluste:** Da  $\Delta p$ -geregelter Pumpen zum Einsatz kommen, beeinflusst der Druckverlust jedes Bauteils die Massenströme. Bauteile mit einer negativen Auslegungsdruckdifferenz werden mithilfe des Modells Rohrleitungen abgebildet. Dabei werden Druckverlust und Massenstrom für den Auslegungszustand definiert. Bauteile mit positiver Auslegungsdruckdifferenz stellen  $\Delta p$ -geregelter Pumpen dar. Massenstrom geregelte Pumpen weisen keine Auslegungsdruckdifferenz auf, da sich ihr Druck als Funktion des Massenstrom-Signals ergibt.

**3.2.4.2 Niedertemperaturwärme-Kreislauf** Der Niedertemperaturwärme-Kreislauf dient der Versorgung der TABS. Folgend werden alle relevanten Komponenten des Systems, welche in Abbildung 4.12 aufgeführt sind, beschrieben. Dem Simulationsmodell der Niedertemperatur-Wärmeversorgung liegen einige Vereinfachungen und Annahmen zugrunde, welche im Folgenden genannt werden:

- Es wird kein redundanter Betrieb berücksichtigt.
- Die RLT-Anlagen 1, 2, 3 und 5 werden ausschließlich durch den Hochtemperaturwärme-Kreislauf versorgt, es wird kein Kühlbetrieb durch den NT-Kreislauf betrachtet.
- Komponenten wie kurze Rohrstücke, Strangreguliertventile, Absperrklappen usw., welche im realen hydraulischen System verbaut sind, werden im Simulationsmodell nicht berücksichtigt, da ihre Abbildung keinen Mehrwert für die Simulation erbrächte

**Umwälzpumpe Erzeuger-Kreislauf P22:** Eine Pumpe vom Typ Grundfos TPE 80-120/2 - Serie 200 ist verbaut. Diese wird vereinfacht über ein idealisiertes Massenstrom geregeltes Modell aus der Buildings-Library abgebildet. Eine Auswertung der vorliegenden Messwerte ergab einen mittleren Massenstrom  $\dot{m}_{P22} = 3,4 \text{ kg/s}$ , weshalb dieser Wert verwendet wird. Als Vereinfachung wird angenommen, dass diese Pumpe sich immer in Betrieb befindet.

**Wärmepumpe:** Die Wärmepumpe stellt die Wärme- und Kälteversorgung des Niedertemperatursystems sicher. Sie weist eine Wärmeleistung von  $167 \text{ kW}$  bei einer nominalen Temperaturpaarung von  $35/32^\circ\text{C}$ , eine Kälteleistung von  $127 \text{ kW}$  bei einer nominalen Temperaturpaarung von  $18/21^\circ\text{C}$  und einem nominalen Volumenstrom von  $47,9 \text{ m}^3/\text{h}$  auf. Als Wärmequelle dient ein Erdsondenfeld mit 101 Bohrpfählen. Das komplexe System wird mit einer idealen Vorlauf-temperatur mit Umschalten zwischen Kühl- und Heizbetrieb über ein Signal des TABS-Modells abgebildet. Dieses wird laut

Funktionsbeschreibung über den Mittelwert von  $T_{amb}$  der letzten 48 h gebildet. Die Komponente wird mittels des Modells Rücklauftemperatur geregelte ideale Wärmeübergabe abgebildet. Das Umschalten zwischen Betriebszuständen erfolgt über eine boolesche Variable. Um das stetige Signal mit Sprung in ein stetig ableitbares Signal zu verwandeln, wird ein PT1-Glied mit einer Zeitkonstante von 300 s nachgeschaltet. Dadurch resultiert die in Abbildung 3.10 gezeigte Antwort auf das Sprungsignal.

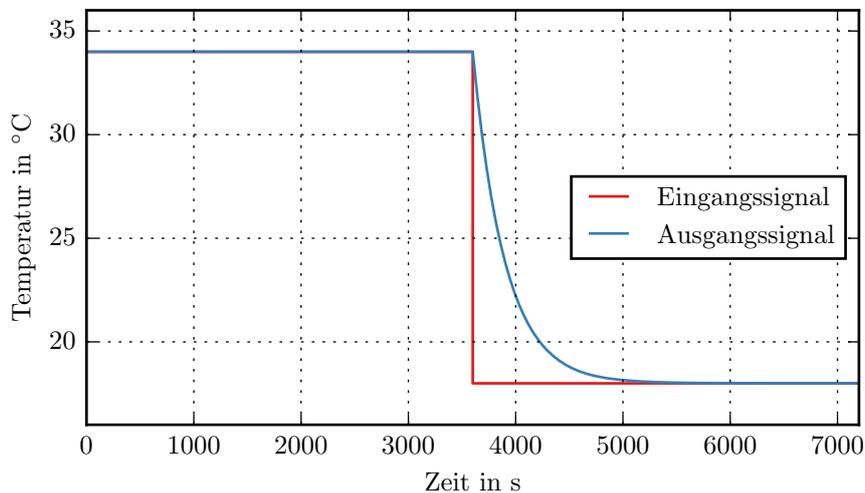


Abbildung 3.10: Stetig differenzierbares Eingangssignal Temperatur Wärmepumpen-Vorlauf [28]

**Mischventile Heizkreis 2 und 3:** Um die gewünschte Vorlauftemperatur am Heizkreis-Eintritt bereitzustellen, wurde eine Beimischschaltung realisiert. In den Heizkreisen 2 und 3 wurden Dreiwege-Ventile unbekannter Bauart mit einem Durchflusswert  $k_{vs} = 40 \text{ m}^3$  verbaut. Die Mischventile werden mithilfe des Modells `ThreeWayEqualPercentageLinear` der Buildings Bibliothek abgebildet. Es muss ein Wert für die Leckage der Komponente angegeben werden. Es wurde ein Wert von 0.1% Leckage-Massenstrom für die Ventilstellungen 0 (ausschließlich Rücklauf-Beimischung) und 1 (keine Rücklauf-Beimischung) angenommen.

**Umwälzpumpen Heizkreis 2 und 3:** Die Umwälzpumpen der Heizkreise, P16 und P17, werden als Pumpen mit idealer Druckdifferenz mittels des Modells `Buildings.Fluid.Movers.FlowControlled_dp` aus der Buildings-Library abgebildet. Im Gegensatz zum hydraulischen Kreis der Wärmequelle sind hier Drossel- und Mischventile verbaut, welche zu variablen Druckverlusten und unterschiedlichen Massenströmen führen. Auswertungen der Volumenströme ergeben eine hohe Streuung der auftretenden Werte. Das Pumpsignal für die beiden Heizkreise wird deshalb auch bei komplett geschlossenen Ventilen der TABS und  $\dot{m} = 0$  nicht auf Null gesetzt, da die Pumpen 16 und 17 ihre Leistung automatisch reduzieren. Die Signale des realen Gebäudes bestätigen diese Regelung. Dort nimmt das Signal zur Ansteuerung der beiden Pumpen lediglich bei einer kompletten Abschaltung im Sommer bei hohen Außentemperaturen den Wert Falsch an.

**Massenströme und Druckverluste:** siehe 3.2.4.1

**Wärmesenken:** Die Wärmesenken der Heizkreise 2 und 3 werden über detaillierte physikalische Mehrzonen-Gebäudemodelle nach DIN EN ISO 13790 abgebildet [11]. Heizkreis 2 entspricht dem Verteilkreis Süd und versorgt die Gebäudezonen 1, 2, 3 und

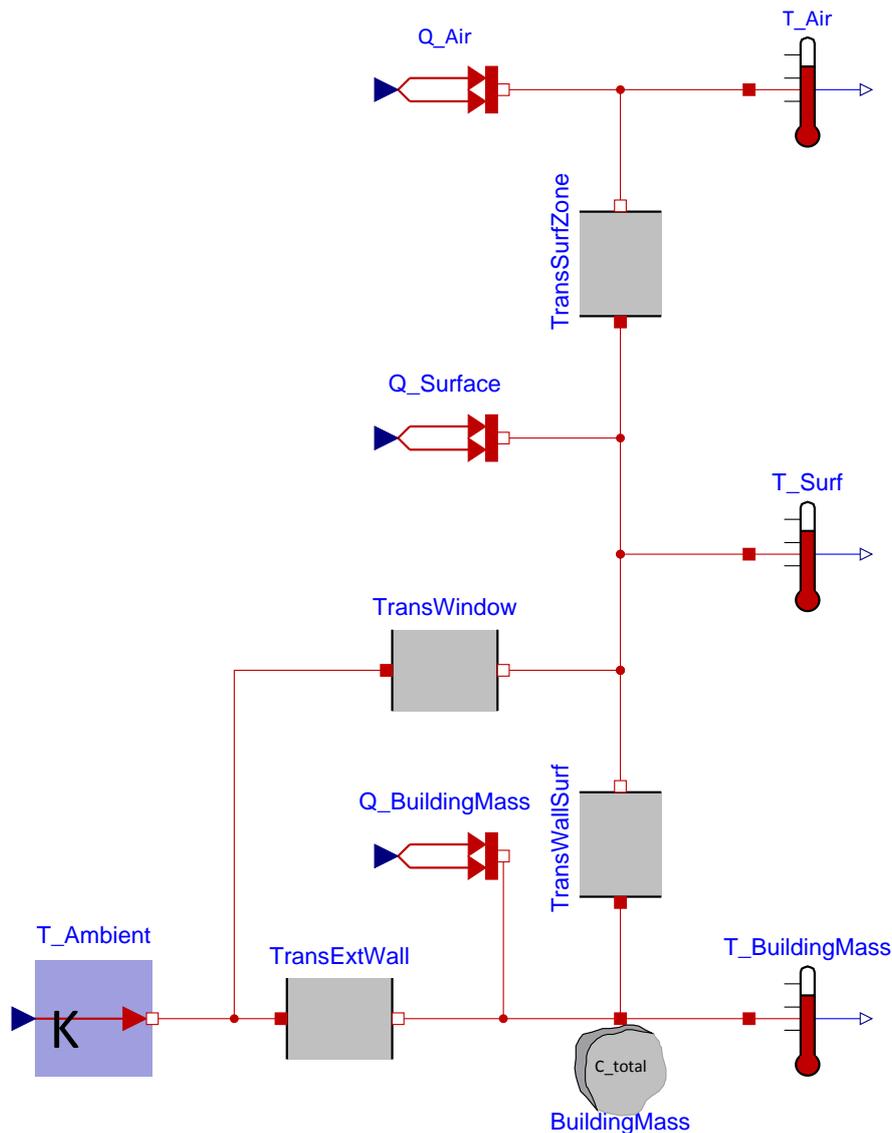


Abbildung 3.11: Visuelle Oberfläche des Zonenmodells nach DIN EN 13790 [28]

4. Heizkreis 3 entspricht dem Verteilkreis Nord und versorgt die Gebäudezonen 5, 6 und 7.

**Membran-Ausdehnungsgefäß:** Zur Regulierung des Systemdrucks wurde das Membran-Ausdehnungsgefäß (MAG) implementiert. Dieses definiert den grundlegenden Systemdruck von  $3 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ . Treten Änderungen im System auf, welche einen schlagartigen Anstieg des Systemdrucks verursachen, sorgt das MAG für einen Druckausgleich. Dadurch können extreme Drücke bzw. Temperaturanstiege oder -abfälle vermieden werden. Das MAG wurde im Simulationsmodell über ein sogenanntes Fixed-Boundary aus der Fluid-Bibliothek der Standard MODELICA<sup>®</sup> Bibliothek abgebildet [1]. Das System wird mit Wasser durchströmt, wobei die Fluideigenschaften in der Modelica Standard Medien Bibliothek für flüssiges Wasser mit konstanten Eigenschaften (ConstantPropertyLiquidWater) hinterlegt sind.

**3.2.4.3 Mehrzonengebäudemodell mit Betonkern-Aktivierung** Die Betonkernaktivierung des Niedertemperatursystems wird mithilfe eines detaillierten physikalischen Modells abgebildet. Das Modell berechnet die Wärmeströme und Temperaturen in den

Gebäudezonen sowie die Wärme- und Kälteversorgung dieser Zonen durch die Bauteilaktivierung. Die Regelung der TABS wird im Abschnitt REF erläutert.

**Gebäudezonenmodell:** Der Energiebedarf des Gebäudes wird in Anlehnung an die Norm DIN EN ISO 1370 [11] zur Berechnung des Energiebedarfs für Heizung und Kühlung modelliert. Dazu wurde ein Gebäudezonenmodell entwickelt, welches die Energieströme und Temperaturen einer thermischen Zone berechnet. Das 5R1C-Modell nach Norm, welches fünf thermische Widerstände und eine thermische Kapazität besitzt, wurde dabei grafisch als 4R1C-Modell dargestellt (siehe Abbildung 3.11). Der fünfte thermische Widerstand, welcher den Lüftungswärmetransfers berechnet, geht über  $\dot{Q}_{air}$  in das Modell laut Gleichung (3.8) ein:

$$\dot{Q}_{air} = 0.5 \dot{Q}_{int} (\rho_{air} c_{p,air} \dot{V}_{air}) (T_{air,amb} - T_{air,zone}) \quad (3.8)$$

Die Berechnung der vier thermischen Widerstände erfolgt mithilfe der in Tabelle 3.1 aufgeführten Werte für  $U_{wall}$ ,  $U_{window}$ ,  $U_{wall,surf}$  und  $U_{surf,air}$  sowie den entsprechenden Fassaden- und Fensterflächen je Zone aus Tabelle REF. Die innere Wärmespeicherfähigkeit berechnet sich für jede Zone mit  $C = C_{eff} \cdot 4 \cdot a_{floor} \cdot Nutzflächenanteil$ , wobei  $C_{eff}$  und  $a_{floor}$  Tabelle 3.1 und der Nutzflächenanteil Tabelle 3.2 entnommen werden können.

Tabelle 3.1: Eingangsparameter in die Gebäudesimulation nach DIN EN ISO 13790 [28]

Parameter	Größe	Einheit	Kommentar
Grundfläche $a_{floor}$	1410	m+2	pro Geschoss
Luftvolumen	17700	m+3	aller Zonen
$C_{eff}$ <sup>1</sup>	370000	JK/m+2	nach [11] - sehr schwere Bauweise
$U_{wall}$ <sup>2</sup>	0,3	W/m <sup>2</sup> /K	
$U_{window}$	1,4	W/m <sup>2</sup> /K	
$U_{wall,surf}$	9,10	W/m <sup>2</sup> /K	
$U_{surf,air}$	3,45	W/m <sup>2</sup> /K	
min. LWR	0,108	1/h	nach [11] - nutzungsfreie Zeit
max. LWR	1,08	1/h	nach [11] - Nutzungszeit
$\dot{Q}_{int,min}$ <sup>3</sup>	2	W/m <sup>2</sup>	nach [11] - nutzungsfreie Zeit
$\dot{Q}_{int,max}$	10	W/m <sup>2</sup>	nach [11] - Nutzungszeit
Beginn Nutzungszeit	08:00	Uhrzeit	
Ende Nutzungszeit	18:00	Uhrzeit	
g-Wert	0,68	%	Energiedurchlassgrad der Fenster
Verschattungsgrad	0,15	%	

<sup>1</sup> innere Wärmespeicherfähigkeit

<sup>2</sup> Wärmeleitfähigkeitskoeffizient

<sup>3</sup> interne Wärmegewinne

Das Bürogebäude der Kreispolizeibehörde wird entsprechend Abbildung 3.12 in neun Simulationszonen eingeteilt. Die Unterteilung in Zonen erfolgt nach der Fassadenausrichtung. Die Zonen 1 und 7, deren Fassadenausrichtungen beide  $20^{\circ}irc$  von Norden abweichen, werden getrennt betrachtet, da sie unterschiedlichen hydraulischen Kreisen zugeordnet werden. Zone 1 wird vom Südkreis versorgt, obwohl sie fast nach Norden orientiert ist. Es existieren vier Etagen, welche alle nahezu baugleich mit dem in

Tabelle 3.2: Eingangsparameter der Zonen in die Gebäudesimulation nach DIN EN ISO 13790 [28]

Zone	Nutzflächenanteil in %	Nutzfläche in m+2	Fassadenfläche in m+2	Fensterfläche in m+2	Azimut <sup>1</sup> in °
1	6.5	369	206.3	75.9	20
2	10.1	570	318.8	131.2	130
3	12.0	677	378.8	180.9	210
4	12.8	724	405.0	161.2	170
5	5.3	302	168.8	51.5	270
6	23.6	1334	746.3	349.6	330
7	6.5	369	206.3	75.9	20

<sup>1</sup> Orientierung der Fassade, von Norden ausgehend - Nord: 0° - Ost: 90°

Abbildung REF gezeigten 4.OG sind. Es wird daher keine Unterteilung nach Stockwerken vorgenommen, sondern die vier übereinanderliegenden Geschosse werde in einer Zone zusammengefasst. Die Zonen 8 und 9, welche sich im Inneren des Gebäudes befinden, werden nicht abgebildet. Des Weiteren werden keine Wärmeströme zwischen einzelnen Zonen berücksichtigt da die Solltemperaturen aller Zonen identisch sind.

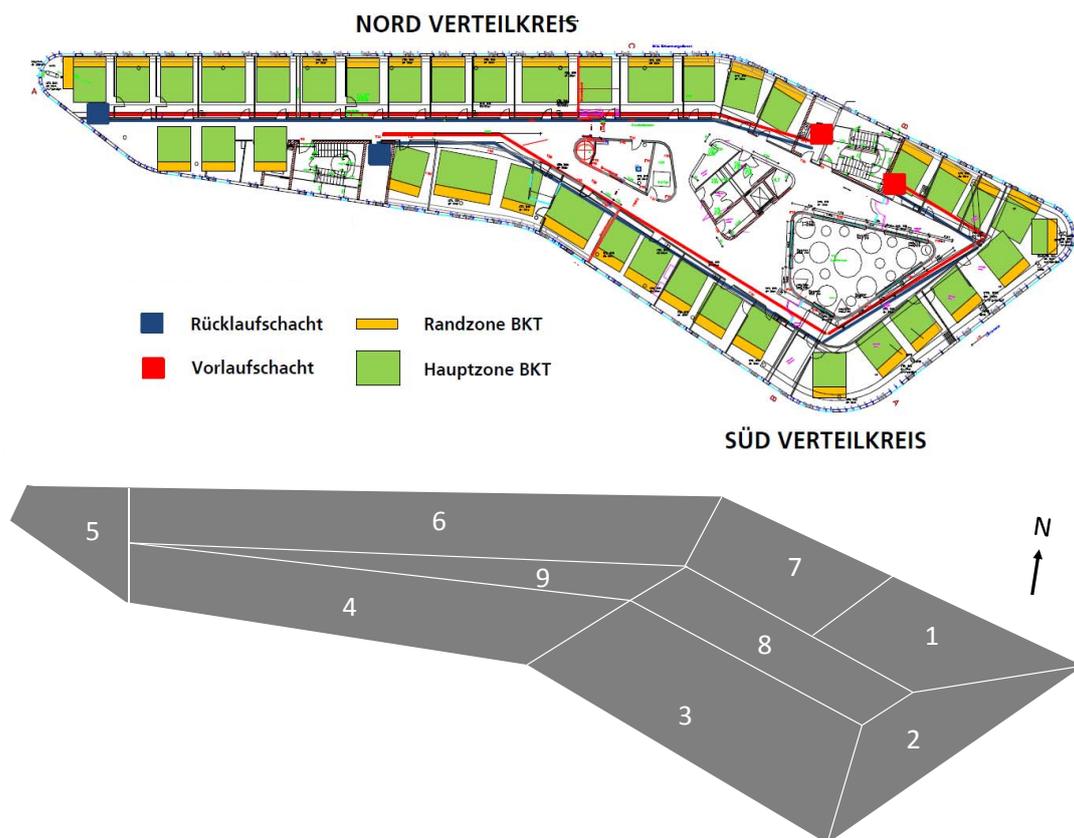


Abbildung 3.12: Zonierung nach Fassadenausrichtung und Heizkreisanbindung [34]

Die Abbildung des Standorts erfolgt mithilfe eines Wetterdatensatzes des Deutschen Wetterdienstes. Es wird das Testreferenzjahr TRY<sub>2010</sub> für den Standort Essen verwendet [6]. Umgebungstemperatur sowie direkte und diffuse Solarstrahlung werden in

stündlichen Intervallen gegeben und für kleinere Simulationszeitschritte linear interpoliert.

**Thermische Bauteilaktivierung:** Wie aus Abbildung 3.12 hervorgeht, existieren zwei Verteilerstränge Süd bzw. Nord, welche mithilfe der *Delta*p-geregelten Pumpen P16 bzw. P17 die Bauteilaktivierung und Randstreifen der Zonen 1, 2, 3 und 4 bzw. 5, 6 und 7 mit Heizwasser versorgen. Die Hydraulik der TABS und SS wird mit den in Abbildung REF gezeigten Bauteilen modelliert. Jeder Strang besitzt ein Stellventil, mit welchem die Durchströmung des Heizkreises definiert wird. Diesem folgt das TABS- bzw. SS-Modell, wobei das Wärmeübertragungsmodell verwendet wird. Das TABS-Modell wird mit einer idealen Wärmesenke (im Kühlfall Wärmequelle) verbunden, um den Wärmeaustausch mit der jeweiligen Gebäudezone abzubilden. Das Wärmesenkenmodell verwendet als Eingangsgröße die Temperatur der Gebäudezone. Gleichzeitig wird der vom TABS-Modell an das Wärmesenkenmodell abgegebene Wärmestrom als Eingangsgröße für die Heizleistung des Gebäudezonenmodells verwendet. Somit ist eine Schnittstelle zwischen den beiden Modellen Gebäudezone und Bauteilaktivierung geschaffen.

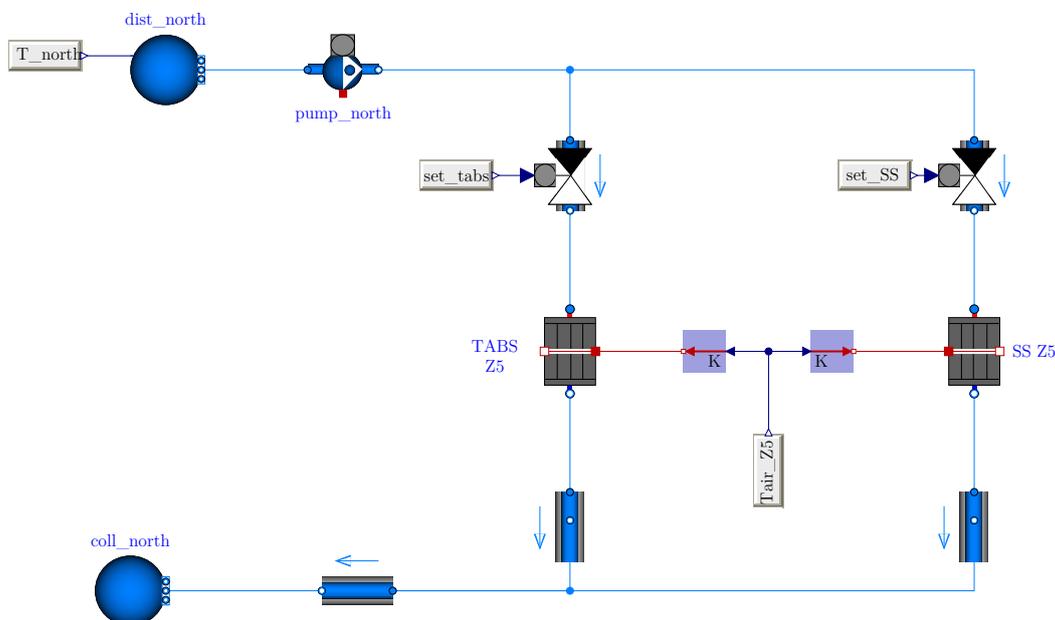


Abbildung 3.13: Vereinfachte visuelle Darstellung des TABS-Modells der Zone 5 [28]

Die Randbedingungen zur Berechnung des Wärmeleitfähigkeitskoeffizienten des TABS-Modells können Tabelle 3.3 entnommen werden. Da das TABS-Modell keinen Druckverlust simuliert, wird anschließend ein Strömungswiderstand in Serie geschaltet. Zur Einbindung des TABS-Modells in das Niedertemperatursystem werden die in Abbildung 3.13 gezeigten Volumina durch Fluidanschlüsse ersetzt. So kann das Modell in das übergeordnete Niedertemperaturmodell eingebunden werden.

**Regelung:** Die Regelung der Bauteilaktivierung sowie der Seitenstreifenelemente besteht zum einen aus einem Zweipunktregler zur Massenstromregelung mithilfe der Ventile, zum anderen definiert sie die Vorlauftemperaturen der Heizkreise 2 und 3 des Niedertemperaturkreises. Zur Erfüllung dieser Aufgaben muss festgelegt werden, ob sich das System im Heiz- bzw. Kühlmodus befindet oder ob ausgeschaltet ist. Die Entscheidung Heizen/Kühlen wird anhand der Außentemperatur gefällt. So wird ein 24 h-Mittelwert der Umgebungstemperatur des Wetterdatensatzes errechnet. Ist dieser

Tabelle 3.3: Randbedingungen zur Abbildung der Thermischen Bauteilaktivierung [28]

Parameter	Größe	Einheit	Kommentar
$l_{pipe2pipe,TABS}$	0,150	m	Länge Rohr zu Rohr
$l_{pipe2pipe,SS}$	0,100	m	Länge Rohr zu Rohr
Dicke Bauteil oben	0,170	m	Rohrmitte zu Rand
Dicke Bauteil unten	0,200	m	Rohrmitte zu Rand
Außendurchmesser Rohr	0,020	m	
Innendurchmesser Rohr	0,018	m	
$\lambda_{Bauteil}$	1,800	W/(m K)	Wärmeleitfähigkeit Beton
$\lambda_{Rohrwand}$	0,450	W/(m K)	Wärmeleitfähigkeit PE
$f_{A,TABS}$	0,250	-	Belegungsfaktor $A_{TABS}/A_{ges}$
$f_{A,SS}$	0,050	-	Belegungsfaktor $A_{SS}/A_{ges}$

kleiner als der in Tabelle 3.4 definierte Grenzwert  $T_{lim,heat}$ , befindet sich die Anlage im Heizmodus. Dann wird der aktuelle Wert der Heizkurven als Sollwert für die Regelung der Vorlauftemperatur verwendet. Nimmt die gemittelte Außentemperatur Werte größer  $T_{lim,cool}$  an, wird gekühlt. Dann wird die Kühlkurve zur Ermittlung der Vorlauftemperatur herangezogen. Bei Temperaturen zwischen den beiden Grenzwerten erfolgt keine Konditionierung der Zonen.

Die Heiz- und Kühlkurven weisen einen linearen Verlauf auf, wobei ihre Grenzwerte anhand der Parameter in Tabelle 3.4 gegeben sind. Für den Heizfall werden unterschiedliche Kurven für den Nord- und Südkreis verwendet. Im Kühlfall wird nach dem selben Sollwert für die Vorlauftemperatur geregelt. Die Heizkurven werden später anhand der Auswertungen in Abschnitt REF, angepasst.

Tabelle 3.4: Eingangsparameter zur Regelung der Bauteilaktivierung [28]

Parameter	Größe	Einheit	Kommentar
$T_{lim,heat}$	10,0	°C	Grenztemperatur Heizen
$T_{lim,cool}$	12,0	°C	Grenztemperatur Kühlen
$T_{amb,n,heat}$	-10,0	°C	Auslegungstemp. Heizkurve
$T_{flow,max,heat,Süd}$	29,0	°C	
$T_{flow,min,heat,Süd}$	26,0	°C	
$T_{flow,max,heat,Nord}$	29,0	°C	
$T_{flow,min,heat,Nord}$	26,0	°C	
$T_{amb,n,cool}$	25,0	°C	Auslegungstemp. Kühlkurve
$T_{flow,max,cool}$	21,0	°C	
$T_{flow,min,cool}$	18,0	°C	
$pRange$	0,1	-	Parameter in Sigmoid-Funktion

Die Ventilstellungen zur Regelung der Durchströmung von TABS und SS werden über einen Abgleich von Soll- und Isttemperatur der jeweiligen Zone geregelt. Die Solltemperatur der Zone berechnet sich dabei in Anlehnung an die Norm DIN EN 15251 unter Berücksichtigung des exponentiell gewichteten gleitenden Mittelwerts der Außentemperatur. Als gemessene Größe wird die aktuelle Raumlufttemperatur der jeweiligen Zone verwendet. Im realen Betrieb wird den Stellventilen ein boolescher Wert zugewiesen. Im vorliegenden Simulationsmodell werden die Ventile mit reellen Werten

zwischen 0 (geschlossenes Ventil) und 1 (offenes Ventil) angesteuert. Um einen kontinuierlichen Verlauf beim Öffnen und Schließen zu generieren, wurde die in Gleichung (3.9) definierte Funktion verwendet.

$$y_{Ventil} = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{10}{p_{Range}} \cdot \Delta T_{soll,ist}\right)} \quad (3.9)$$

Dabei kann der Wert für  $p_{Range}$  Tabelle 3.4 entnommen werden.  $T_{soll,ist}$  gibt die Temperaturdifferenz zwischen Soll- und Istwert der Raumlufttemperatur an, wobei im Kühlfall die Vorzeichen umgekehrt werden. Abbildung 3.14 zeigt die Ventilstellung für den Heizfall bei einer Solltemperatur von  $22^\circ\text{C}$ . Es wird deutlich, dass durch Erhöhen des Parameters  $p_{Range}$  auch eine Massenstromdrosselung und somit ein Teillastverhalten der TABS bzw. SS bei geringen Abweichungen zwischen Soll- und Istwert erzeugt werden kann. Die Berechnung der Ventilstellung erfolgt für jede Zone und wird an die jeweiligen Stellventile der Seitenstreifen übergeben. Die Ventilstellung der TABS erfolgt im realen Betrieb anhand sogenannter Führungsräume. Dabei existieren für jede Etage die drei Führungsräume Süd, West und Nord, deren Raumlufttemperatur erfasst und als Istwert für die Regelung der TABS verwendet wird. Die TABS einer Etage für die Simulationszonen 1, 2, 3 und 4 werden folglich synchron angesteuert. Da in dem vorliegenden Modell übereinanderliegende Räume in einer Zone zusammengefasst werden, reduziert sich die Anzahl der Signale auf drei Stellsignale zur Steuerung der TABS-Ventile. Das mit der Istwerttemperatur von Zone 3 erzeugte Signal wird dabei auf die TABS der Zonen 1, 2, 3 und 4 angewendet. Der Istwert von Zone 6 wird für die Regelung der TABS von Zone 6 und 7 gebraucht. Lediglich die TABS von Zone 4 sind mit einer exklusiven Regelung ausgestattet.

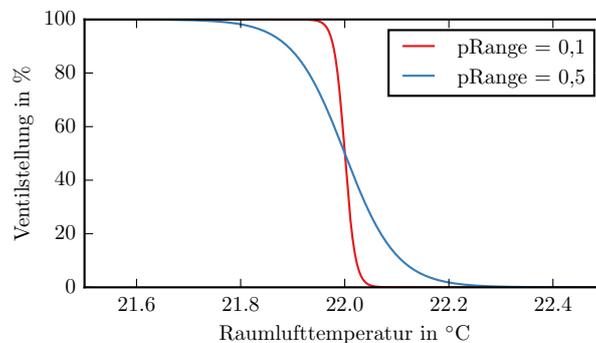


Abbildung 3.14: Ventilstellung im Heizfall von TABS und SS in Abhängigkeit der Raumlufttemperatur [28]

### 3.2.5 Versorgung der RLT-Anlagen 1, 2, 3 und 5

Die RLT-Anlagen 1, 2, 3 und 5 werden, wenn sich der Niedertemperaturkreis im Kühlmodus befindet, über diesen versorgt. Aus den Messdaten wurde erkannt, dass die Anlage nur wenige Stunden im vorhandenen Messzeitraum über den NT-Kreis versorgt wird. Deshalb wurde ihre Implementierung hier vernachlässigt und nur im Heizmodus über den Hochtemperaturkreis abgebildet.

### 3.2.6 Kalibrierung

Für die Kalibrierung des Modells wurden Maßnahmen zur Anpassung der Simulationsmodelle an messwertbasierte Daten beschrieben. Da die Bausteine zur Abbildung von Wärmequellen und Wärmesenken die Wärmeübertragungsvorgänge idealisiert betrachten, ist ein Kalibrieren der Teilmodelle anhand zeitlicher Verläufe von Messwerten nicht sinnvoll. Außerdem wird bei der Mehrheit der Wärmesenken keine Durchflussmessung vorgenommen, was eine Kalibrierung weiter erschwert. Dennoch können Kalibrierungen von Parametern für alle Teilsysteme durchgeführt werden.

Für die dynamische Kalibrierung des Niedertemperatur-Kreislaufs existieren zwar Messpunkte für alle relevanten Temperaturzustände, es wird jedoch nur der Massenstrom des Heizkreis-Verteilers bzw. der Wärmepumpe gemessen. Demzufolge können keine Aussagen zu Wärmeströmen der einzelnen Heizkreise gemacht werden. Es können jedoch Anpassungen bestimmter Parameter anhand statistischer Auswertungen von Messdaten durchgeführt werden. Außerdem wird eine Anpassung der Druckverluste durchgeführt.

**HT-Kreislauf - Blockheizkraftwerk:** Der konstante Massenstrom, welchen Pumpe P6 zur Durchströmung des BHKW bereitstellt, wurde von seinem Nennwert von  $2.43 \text{ kg/s}$  auf einen messwertbasierten Wert kalibriert. Dazu wurde eine statistische Analyse der Volumenstrom-Messungen unter Annahme einer konstanten Dichte  $\rho_{H_2O} = 998 \text{ kg/m}^3$  für den Zeitraum 20.02. – 23.06.2015 durchgeführt. Abbildung 3.15 zeigt Ergebnisse dieser Analyse in einem Boxplot.

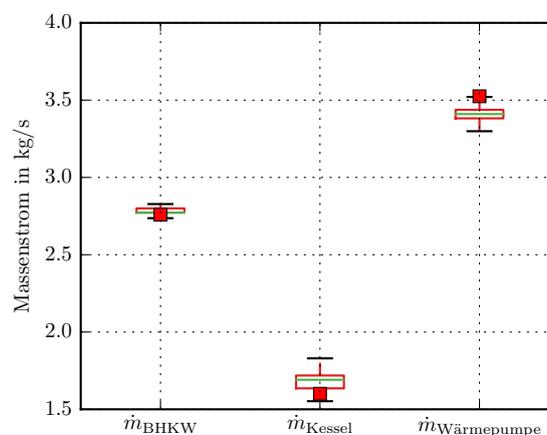


Abbildung 3.15: Statistische Analyse der gemessenen Massenströme durch BHKW und Kessel [28]

Massenströme kleiner  $0.1 \text{ kg/s}$  wurden dabei nicht berücksichtigt um Zustände ohne Betrieb und beim Anfahren auszuschließen. Es wird deutlich, dass der Massenstrom für das BHKW einer sehr geringen Streuung unterliegt. Als kalibrierter Parameter wurde der Mittelwert mit  $\dot{m}_{BHKW} = 2.76 \text{ kg/s}$  verwendet. Die Soll-Temperatur des BHKW-Rücklaufs wurde durch eine Optimierungssimulation mit GENOPT auf den Mittelwert der gemessenen Vorlauftemperatur kalibriert. Abbildung 3.16 zeigt gefilterte Werte der Temperaturen  $T_{VL,BHKW,mea}$  und  $T_{VL,BHKW,sim}$  bei vorhandener Durchströmung des BHKW für die reale Messung, die nicht kalibrierte Simulation sowie die kalibrierte Simulation. Es wird deutlich, dass die am häufigsten auftretende Temperatur angepasst werden konnte. Die Art der Verteilung von auftretenden Temperaturen konnte durch

die Sollwert-Änderung jedoch nicht optimiert werden, da das BHKW in der Simulation idealisiert mit einer optimierten PI-Regelung abgebildet wird.

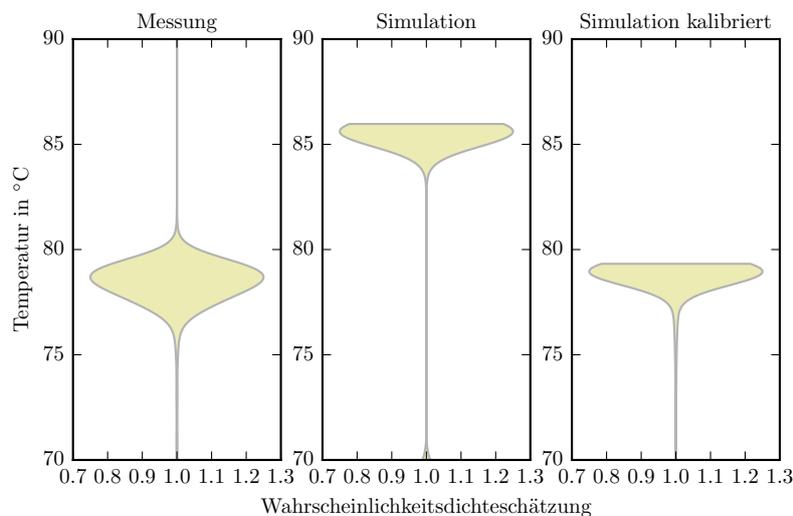


Abbildung 3.16: Schätzung der Wahrscheinlichkeitsdichteverteilung von  $T_{VI,BHKW}$  für Messung, Simulation und kalibrierter Simulation

**HT-Kreislauf - Spitzenlastkessel:** Für den Parameter zur Definition des konstanten Massenstroms zur Durchströmung des Kessels wurde der in Abbildung 3.15 gezeigte Mittelwert verwendet. Der Wert musste nur geringfügig angepasst werden, denn der Auslegungsmassenstrom  $\dot{m}_{SLK} = 1.55 \text{ kg/s}$  wurde auf den Mittelwert des gemessenen Massenstroms  $1.60 \text{ kg/s}$  angehoben. Es wird deutlich, dass der Massenstrom des Kessels einer größeren Streuung unterliegt als jener des BHKW. So liegen die Extremwerte  $0.25 \text{ kg/s}$  statt  $0.1 \text{ kg/s}$  auseinander. Die Anforderung der Pumpe erfolgt wie im Abschnitt Pufferspeicher in Abschnitt 3.2.4.1 beschrieben. Zur Kalibrierung der Vorlauftemperatur des Kessels wurden die in Abbildung 3.17 gezeigte Auswertung vorgenommen welche belegt, dass es zu einer großen Streuung von Vorlauftemperaturen des Kessels für Zustände mit Durchströmung kommt. Als kalibrierte Soll-Temperatur wurde der mit einem roten Quadrat markierte Mittelwert von  $63.81^\circ\text{C}$  verwendet. Eine Kalibrierung durch Abgleich von gemessenen und simulierten Werten für jeden Zeitschritt erscheint an dieser Stelle nicht sinnvoll, da das Modell eine ideale Vorlauftemperatur erzeugt.

**HT-Kreislauf - Brauchwarmwasser-Bereitung:** Für die Heizkreise 1 bis 3 (Brauchwarmwasser-Bereitung, statische Heizung und RLT-Anlage 4) existieren keine Messpunkte zu Massenströmen bzw. Wärmemengen pro Heizkreis. Deshalb war keine Kalibrierung dieser Heizkreise möglich. Da bei der Brauchwarmwasser-Bereitung keine Rücklaufbeimischung eingebaut ist, kann auch keine Kalibrierung der Vorlauftemperatur vorgenommen werden.

**HT-Kreislauf - RLT-Anlage 4:** Für Heizkreis 3 kann ebenfalls lediglich der Parameter  $T_{VI,HT,HK3}$  kalibriert werden, da keine Durchfluss-Messung für das Teilsystem durchgeführt wird. Abbildung 3.17 zeigt die statistische Auswertung der Vorlauftemperatur von HK3 für den Zeitraum 03.04. – 14.05.2015, da hier von einem regulären Betrieb der Anlage ausgegangen wird. Im Gegensatz zu anderen Auswertungen konnten hier jene Zustände, bei welchen keine Durchströmung auftritt, nicht identifiziert werden. Es zeigt sich, dass im Gegensatz zu den beiden anderen dargestellten Vorlauftempera-

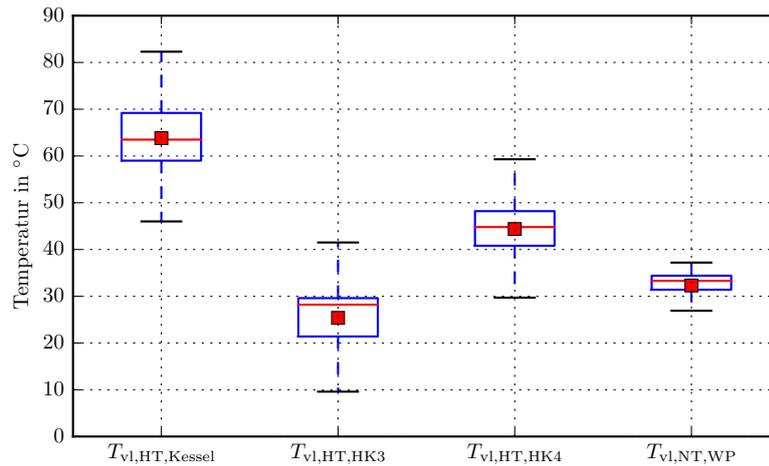


Abbildung 3.17: Boxplot für gemessene Vorlauftemperaturen von Kessel, HK3, HK4 und Wärmepumpe [28]

turen, in Abbildung 3.17 Median und Mittelwert von  $T_{VI,HT,HK3}$  deutlich von einander abweichen. Deshalb wurde in Abbildung 3.18 die Verteilung des selben Datensatzes dargestellt. Sie zeigt ein absolutes Maximum bei  $29^{\circ}C$  sowie ein lokales Maximum bei etwa  $15^{\circ}C$ . Das lokale Maximum kommt durch Betriebszustände ohne Durchströmung zustande. Für die Kalibrierung wird folglich  $T_{VI,HT,HK3} = 29,1^{\circ}C$  verwendet.

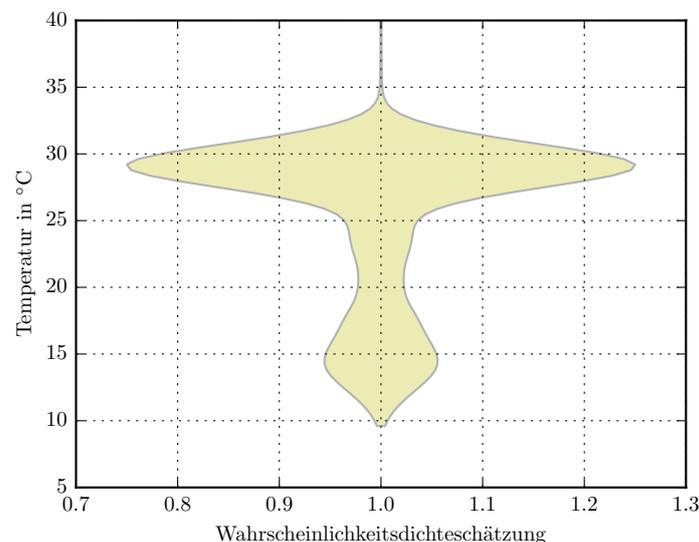


Abbildung 3.18: Schätzung der Wahrscheinlichkeitsdichteverteilung gemessener  $T_{VI,HT,HK3}$  im Zeitraum 03.04. bis 14.05.2015 [28]

**HT-Kreislauf - RLT-Anlagen 1, 2, 3 und 5:** Die RLT-Anlagen 1, 2, 3 und 5 werden zusammengefasst als eine Wärmesenke betrachtet. Mithilfe der Messdaten der Temperaturfühler sowie des Volumenstromsensors kann der Wärmestrom, welcher durch die RLT-Anlagen 1, 2, 3 und 5, wie in Gleichung (3.7) beschrieben, berechnet werden. Dieser Wärmestrom dient als Eingangsgröße zur Modellierung von Heizkreis 4. Leider liegen keine Informationen zum Volumenstrom vom Heizkreisverteiler (HKV) an den

Heizkreis vor. Es wurde eine Systematik des Freischneidens angewandt, um die Kalibrierung des Systems vornehmen zu können. Dabei wurden die Komponenten des Heizkreises 4, aus der Gesamtsimulation des Hochtemperatur-Systems entnommen und separat betrachtet. Alle vorhandenen Messgrößen, bis auf die Stellung  $y$  des Mischventils, wurden dabei als Eingangsgrößen der Simulation verwendet. Der Anschluss an den Heizkreisverteiler wird hier über eine ideale Fluidquelle und -senke (Buildings Library Fluid.Sources.Boundary\_pT) beschrieben, welche die gemessene Fluidtemperatur  $T_{vl,HKV}$  vor der Mischung bereitstellt. Die Strömungswiderstände wurden beibehalten. Die Temperatur  $T_{Vl,RLT}$  nach der Rücklaufbeimischung wird wie im Nominalmodell auch durch einen PI-Regler eingestellt, wobei nun an Stelle des konstanten Sollwerts der gemessene Wert von Sensor 3 verwendet wird. Es ergeben sich für gemessenen und simulierten Zustand dieselben Rücklauftemperaturen  $T_{Rl,RLT}$ . Der gemessene Volumenstrom wird unter der Annahme einer konstanten Dichte mittels des Pumpenmodells aufgeprägt. Ziel dieser Modellierung ist, die Parameter des Mischventils so durch Optimierungsrechnungen mit GENOPT® zu kalibrieren, dass die Abweichung zwischen gemessener und simulierter Ventilstellung minimiert wird. Bei der Durchführung dieser Optimierung musste jedoch festgestellt werden, dass die Ventilstellung des Mischventils keinem plausiblen Verhalten folgt. Abbildung 3.19 zeigt exemplarisch den Verlauf aller relevanten Messgrößen zur Darstellung des Systems.

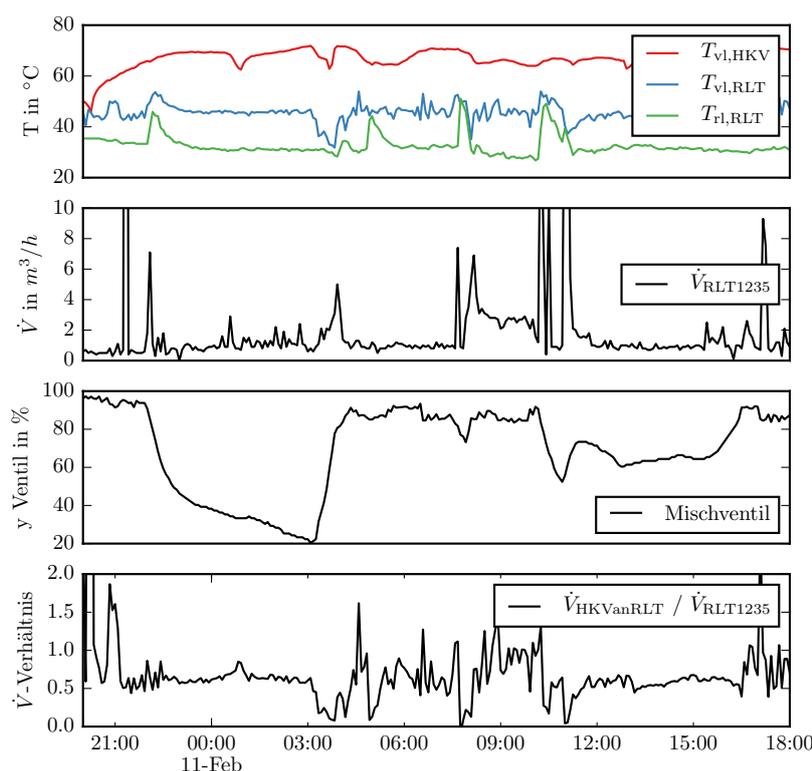


Abbildung 3.19: Plausibilitätskontrolle Messwerte zur Kalibrierung von HT Heizkreis 4 [28]

Es wird deutlich, dass kein proportionaler Zusammenhang zwischen den Temperaturverläufen und der Ventilstellung besteht. Zwar reagiert das Ventil teils auf erhöhte Rücklauftemperaturen, andererseits kommt es im Zeitraum 10.02.201522 : 00 bis 11.02.201504 : 00 zu einer Veränderung der Ventilstellung, welche sich nicht anhand

der restlichen Messwerte erklären lässt. Es können zwei mögliche Ursachen für diesen Sachverhalt genannt werden. Zum einen können fehlerhafte Messwerte der Temperaturen oder des Volumenstroms dazu führen, dass ein vorhandener Zusammenhang zwischen Messwerten und Ventilstellung versteckt wird. Zum anderen kann vermutet werden, dass eine falsche Zuordnung des Ventil-Steuersignals vorliegt. Aus den genannten Gründen konnte keine sinnvolle Kalibrierung des Mischventils des HT-Systems durchgeführt werden. Die nicht kalibrierte Vorlauftemperatur des Hochtemperatur-Heizkreises Nr. 4 wurde anhand der in Abbildung 3.17 gezeigten statistischen Auswertung der Vorlauftemperatur von Heizkreis 4 angepasst. Für die Auswertung wurden ausschließlich jene Temperaturen betrachtet, bei denen es zu einer Durchströmung des Systems kommt. Es wird deutlich, dass die in der Revisionszeichnung vorgesehene Temperatur von  $35^{\circ}\text{C}$  im realen Betrieb überschritten wird. Die Streuung der Temperaturen, gemessen an den 25% und 75%-Quartilen, ist gering da diese bei  $40.8$  bzw.  $48.2^{\circ}\text{C}$  liegen.  $T_{VI,HT,HK3}$  wurde auf den Mittelwert der gemessenen Temperaturen mit einem Wert von  $44.38^{\circ}\text{C}$  kalibriert.

**HT-Kreislauf - Statische Heizung:** Im Auslegungsfall wird das Heizsystem mit den Werten  $70/50^{\circ}\text{C}$  betrieben. Die Vorlauftemperatur ist an die Außentemperatur gekoppelt. Zur Kalibrierung der Heizkurve wurden gemessene Vorlauftemperaturen  $T_{VI,HT,HK2}$  bei  $T_{amb} < 15^{\circ}\text{C}$  ausgewertet. Anhand der Messwerte wurde die in Abbildung 3.20 rot dargestellte lineare Regression gebildet. Somit wird die kalibrierte Heizkurve mit Gleichung (3.10) definiert.

$$T_{VI,HT,HK2} = \begin{cases} 46,15^{\circ}\text{C} & \text{für } T_{amb} < -10^{\circ}\text{C} \\ -0,62 \cdot T_{amb} + 39,94 & \text{für } -10^{\circ}\text{C} < T_{amb} < 15^{\circ}\text{C} \end{cases} \quad (3.10)$$

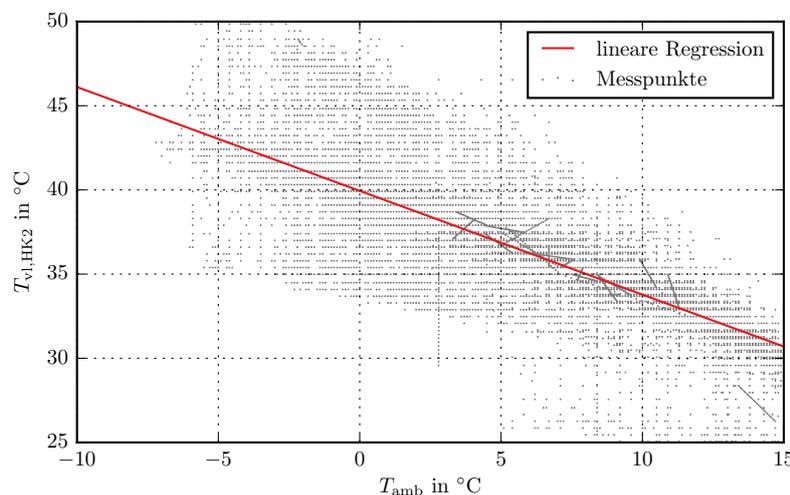


Abbildung 3.20: Gemessene  $T_{VI,HT,HK2}$  über  $T_{amb}$  zur Bestimmung der Heizkurve [28]

**NT-Kreislauf – Wärmepumpe:** Die Wärmepumpe wird durch ein idealisiertes, Rücklauf-temperatur geführtes Modell dargestellt. Zur Kalibrierung des Parameters  $T_{VI,NT,WP}$  wurden Quantil und Mittelwert der gemessenen Vorlauftemperaturen ausgewertet (siehe Abbildung 3.17). Es wurden ausschließlich Zeiträume betrachtet, bei denen kein redundanter Betrieb vorliegt, da sich die gemessene Temperatur ansonsten durch Beimischung von Hochtemperatur-Fluid verändert. Der kalibrierte Wert beträgt demnach

32.30°C. Für den zu definierenden Massenstrom wurde die selbe Analyse durchgeführt und in Abbildung 4.20 visualisiert, wobei wieder nur Zeiträume ohne redundanten Betrieb betrachtet wurden. Dadurch wurde der Parameter Massenstrom nur minimal von 3.5 kg/s auf 3.52 kg/s angepasst.

**Wärmesenken:** Eine Kalibrierung des TABS-Modells ist nicht möglich, da keine Messdaten zu Massenströmen, Wärmebilanzen, Nutzungsinformationen oder solaren Erträgen vorliegen. Laut Revisionsplanung werden die Heizkreise 2 und 3 des NT-Systems mit der Temperaturpaarung 35/32°C betrieben. Die Vorlauftemperatur ist an die Außentemperatur gekoppelt. Zur Kalibrierung der Heizkurven wurden die gemessene Vorlauftemperaturen  $T_{VI,NT,HK2}$  und  $T_{VI,NT,HK3}$  bei  $T_{amb} < 15^\circ\text{C}$  ausgewertet. Anhand der Messwerte wurden die in Abbildung 3.21 rot dargestellten linearen Regressionen gebildet. Somit werden die kalibrierten Heizkurven durch die Gleichungen (3.11) und (3.12) definiert.

$$T_{VI,NT,HK2} = \begin{cases} 32,1^\circ\text{C} & \text{für } T_{amb} < -10^\circ\text{C} \\ -0,19 \cdot T_{amb} + 28,30 & \text{für } -10^\circ\text{C} < T_{amb} < 15^\circ\text{C} \end{cases} \quad (3.11)$$

$$T_{VI,NT,HK3} = \begin{cases} 28,8^\circ\text{C} & \text{für } T_{amb} < -10^\circ\text{C} \\ -0,14 \cdot T_{amb} + 27,39 & \text{für } -10^\circ\text{C} < T_{amb} < 15^\circ\text{C} \end{cases} \quad (3.12)$$

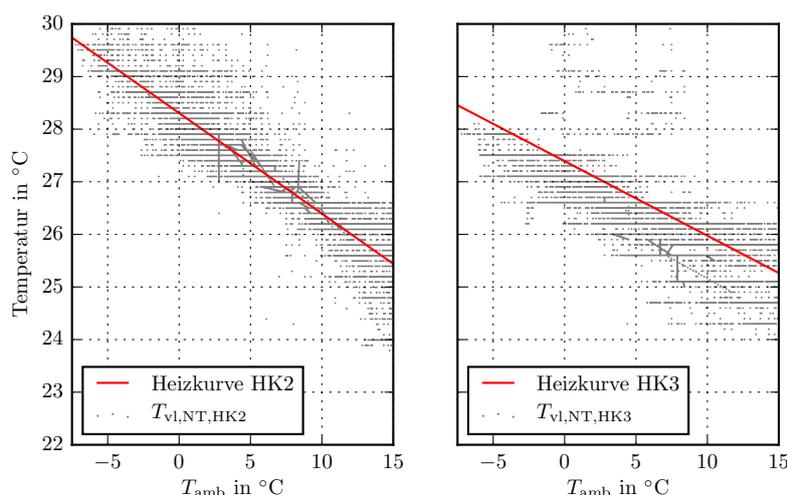


Abbildung 3.21: Gemessene  $T_{VI,NT,HK2}$  und  $T_{VI,NT,HK3}$  über  $T_{amb}$  zur Bestimmung der Heizkurven [28]

**Mischventile:** Die Mischventile der Heizkreise 2 und 3 werden über physikalisch-kennlinienbasierte Modelle abgebildet und sind kalibrierbar. Durch das Fehlen von Volumenstromsensoren vor und nach den Ventilen konnte jedoch keine Kalibrierung durchgeführt werden. Eine Analyse des Wärmestroms an die beiden Heizkreise, der Ventilstellungen der TABS sowie der Ventilstellungen der Mischventile ergibt eine Diskrepanz zwischen dem gemessenen Wärmestrom von NT-Verteiler an TABS und den Ventilstellungen der TABS. So treten beispielsweise im Zeitraum 15.01. – 19.01.2015 Zeitfenster auf, in welchen alle TABS-Ventile geschlossen sind. Dies lässt sich jedoch anhand des Wärmestroms von der NT-Wärmeversorgung nicht plausibilisieren. Obwohl die Randstreifen der Bauteilaktivierung raumweise angesteuert werden und deshalb unabhängig von den in Abbildung 3.22 gezeigten Ventilstellungen sind, müsste ein deutlicher Einfluss auf den Wärmestrom erkennbar sein.

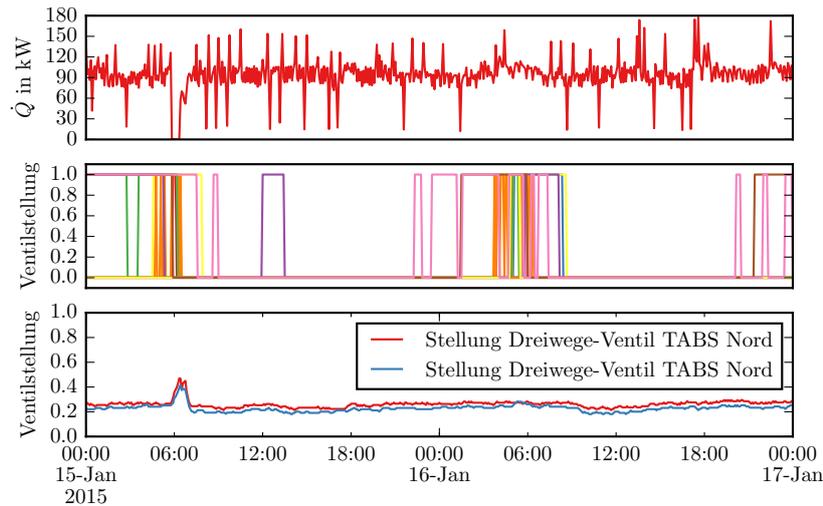


Abbildung 3.22: NT-Wärmestrom und Ventilstellungen im Zeitraum 15. – 19.01.2015 [28]

### 3.2.7 Ergebnisse der nominalen Simulationsmodelle der HT- und NT-Versorgung

**Hochtemperaturwärme-Kreislauf:** Abbildung 3.23 zeigt den wöchentlich kumulierten Energiebedarf der vier Heizkreise des Hochtemperaturwärme-Kreislaufs

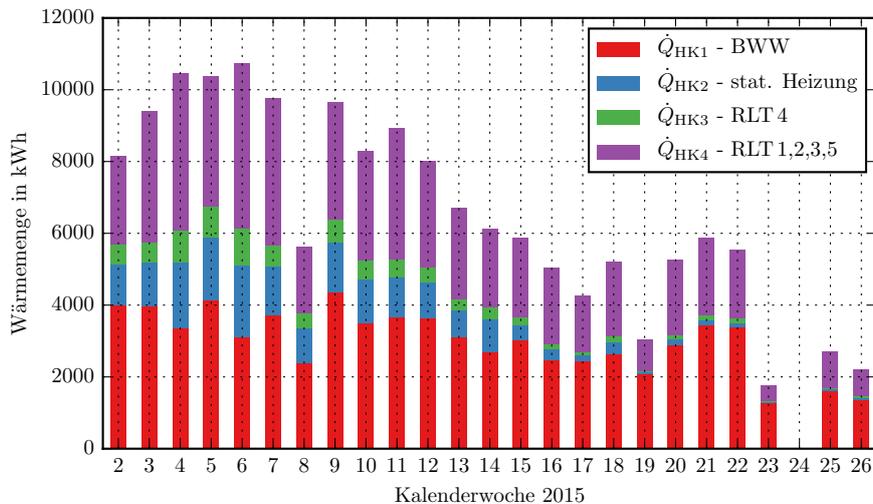


Abbildung 3.23: Wöchentlicher Wärmebedarf der Hochtemperatur-Heizkreise [28]

Der Energiebedarf der Zonen wird anhand von Messwerten generiert. In den Kalenderwochen 8 und 19 sowie 23 bis 25 kommt es zu Ausfällen bei der Messwerterfassung, weshalb die Verbraucher dann vermeintlich keinen Wärmebedarf haben. Deshalb werden in diesen Zeiträumen starke Einbrüche beim Wärmebedarf aller Heizkreise sichtbar. Es wird deutlich, dass die Heizkreise 1 und 4 mit 45 % bzw. 37 % den Großteil des Wärmebedarfs benötigen, wohingegen HK2 und HK3 lediglich 12% bzw. 6% ausmachen. Außerdem kann ein saisonaler Einfluss bei den Heizkreisen 2, 3 und 4 identifiziert werden, wohingegen HK1 keiner jahreszeitlichen Schwankung unterliegt. Es erscheint bemerkenswert, dass die RLT-Anlagen 1, 2, 3 und 5 (HK4) in den Kalenderwochen 25 bzw. 26 22 % bzw. 16 % ihres maximalen wöchentlichen Wärmebedarfs benötigen. Ver-

mutlich kommen diese hohen Werte durch die Erwärmung kalter Außenluft nachts oder in den Morgenstunden zustande. In diesem Zeitraum lagen verhältnismäßig niedrige Außentemperaturen vor. So bewegt sich die über 24 h gemittelte Umgebungstemperatur  $T_{amb}$ , 24 h in einem Bereich von 8 – 15 °C. In Abbildung 3.24 wird der mittlere stündliche Wärmestrombedarf der vier Heizkreise der HT-Versorgung in geordneten Dauerlinien dargestellt.

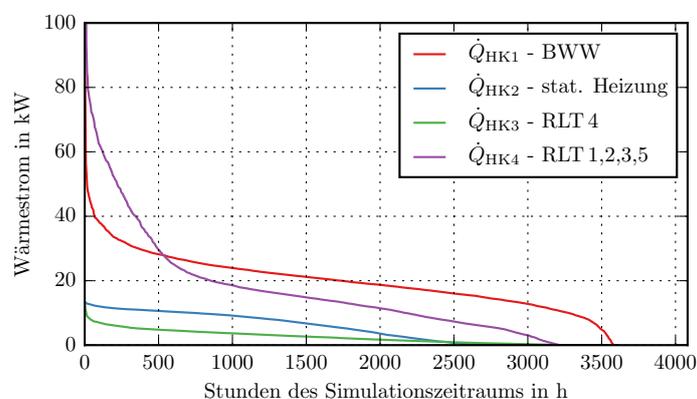


Abbildung 3.24: Geordnete Dauerlinie des stündlich gemittelten Wärmestrombedarfs der Hochtemperatur-Heizkreise [28]

Es wird deutlich, dass sich die maximalen Wärmeströme der Heizkreise stark unterscheiden. Während HK2 und 3 Leistungen von maximal 13 kW benötigen, liegen die Maxima für HK1 bzw. HK4 bei 85 bzw. 101 kW. Während 530 h ist der Wärmebedarf von HK4 höher als jener von HK1. Die restliche Zeit besitzt HK1 den höchsten Wärmebedarf. HK2 und HK3 weisen während 2440 h bzw. 2444 h Wärmeströme über 1 kW auf und sind damit weniger häufig in Betrieb als HK4 mit 3131 h und HK1 mit 3564 h. Abbildung 3.25 zeigt in der oberen Teilgrafik den mittleren stündlichen Wärmestrom des BHKW für den gesamten Simulationszeitraum und unten die geordnete, absteigende Dauerlinie desselben Wärmestroms. Zusätzlich ist in der unteren Teilgrafik die fiktive, geordnete Lastkurve des BHKW bei der Nennleistung von 204 kW abgebildet. In der oberen Teilgrafik werden die Lücken in der Datenerfassung noch deutlicher sichtbar als in Abbildung 3.23. Außerdem ist zu erkennen, dass das BHKW nur selten mit Nennleistung betrieben wird. Zwar ist eine minimale thermische Leistung des BHKW von 102 kW im Simulationsmodell implementiert, durch die Bildung von stündlichen Mittelwerten aus den fünfminütlichen Simulationswerten, werden hier jedoch auch niedrigere Wärmeströme abgebildet. Die geordnete Dauerlinie des BHKWs zeigt 2880 h BHKW-Betrieb an. Wird der Wärmestrom über die Zeit integriert und durch die maximale Heizleistung des BHKW geteilt, ergibt sich ein Betrieb bei Vollast von 819 h, was einer Auslastung von 20.1% entspricht. Dabei muss jedoch berücksichtigt werden, dass 428 h ohne Messwertaufzeichnung und somit mit fehlendem Wärmebedarf mit einfließen. Es wird von einer Überdimensionierung des BHKW ausgegangen.

**Niedertemperaturwärme-Kreislauf:** Abbildung 3.26 zeigt den absoluten Energiebedarf pro Monat für die Heizkreise 2 und 3. Negative Werte geben dabei von den Heizkreisen aufgenommene Wärme (Kühlen des Gebäudes) an. Es wird sichtbar, dass das System lediglich in den Monaten Oktober bis März Heizenergie benötigt. In den Monaten April bis September existiert nahezu ausschließlich Kühlenergiebedarf. März und Oktober sind Monate, welche sowohl Heiz- als auch Kühlenergiebedarf benötigen, wo-

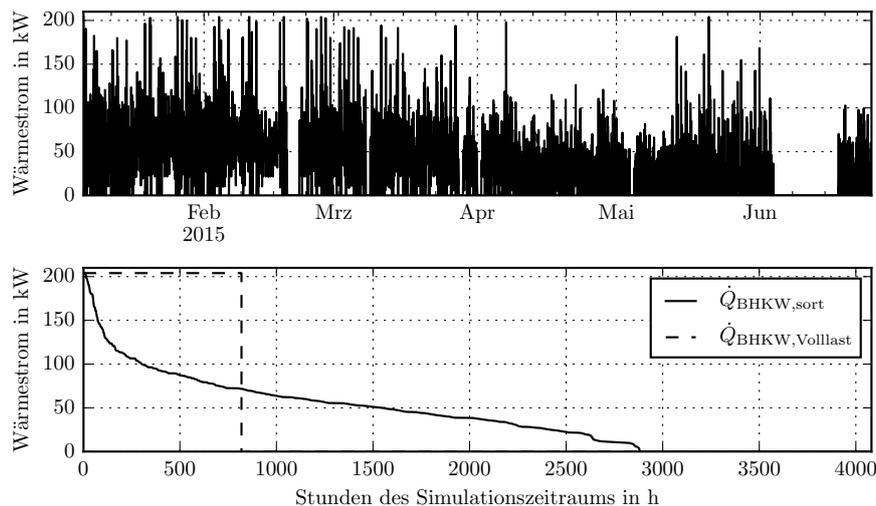


Abbildung 3.25: Stündlich gemittelte Heizleistung und geordnete Dauerlinie des BHKW [28]

bei im März fast ausschließlich der südliche Gebäudeteil (HK2) gekühlt werden muss. Der höchste Wärmebedarf tritt im Monat Dezember mit  $31\,940\text{ kWh}$  auf, wobei Heizkreis 2 aufgrund des höheren Grundflächen- und Fassadenanteils  $1830\text{ kWh}$  mehr konsumiert. Im Monat Juli kommt es zum höchsten Bedarf an Kühlenergie mit  $39\,690\text{ kWh}$ , wobei HK2 58% des Kühlenergiebedarfs bestreitet. Abbildung 3.27 zeigt die Wärmeströme für Wärmesenken von Heizkreis 2 und 3. Die Simulation wurde mit Zeitschritten von  $300\text{ s}$  durchgeführt. Für eine übersichtliche Darstellung werden hier stündliche Mittelwerte gezeigt. Von Mitte Juni bis Ende September wird ununterbrochen Wärme aus dem Gebäude abgeführt. Anhand der Zonentemperaturen kann erkannt werden, dass das System hier mit maximaler Leistung arbeitet, wobei es zu einer Überhitzung der Zonen kommt. Die maximale Leistung des Systems wird dabei durch die Temperaturniveaus im Kühlfall begrenzt. Durch eine Absenkung der Vorlauftemperatur  $T_{flow,min,cool}$  für den Kühlfall, könnte die Kühlleistung der TABS erhöht werden. Dann würde die geothermische Wärmepumpe jedoch öfter im Zustand mechanischer Kühlung arbeiten, da durch freie Kühlung (Durchströmen der Erdsonden ohne Kompressionskühlung) keine beliebig niedrigen Vorlauftemperaturen erzielt werden können. Eine Erhöhung des Massenstroms zur Steigerung der Kühlleistung wäre ebenfalls denkbar, wird jedoch wegen steigender Hilfsenergie der Umwälzpumpen nicht empfohlen. In Abbildung 3.28 werden die Wärmeströme aus Abbildung 3.27 nach ihrer Größe sortiert dargestellt. So kann erkannt werden, dass die maximale Leistung für Heiz- und Kühlfall bei Heizkreis 2 höher ist als bei HK3. Dies kann damit begründet werden, dass HK2 eine größere Gebäudefläche versorgt. HK2 besitzt mit  $1540\text{ h/a}$  einen höheren Wärmebedarf als HK3. Bei Heizleistungen von  $0 - 18\text{ kW}$  weist HK3 jedoch den höheren Energiebedarf auf. Dies begründet sich durch die direkten solaren Erträge, welche fast ausschließlich an Gebäudezonen entfallen, die von HK2 versorgt werden. Die zusätzlichen Wärmequellen reduzieren den Wärmebedarf von HK2 deutlich und führen dazu, dass hier  $900\text{ h/a}$  weniger geheizt wird als bei HK3, was 37.5 Tagen entspricht. Wegen der solaren Erträge muss der südliche Verteilerkreis jedoch  $200\text{ h/a}$  mehr gekühlt werden. Außerdem ist die Kühlleistung für HK2 durchschnittlich  $7.5\text{ kW}$  höher als jene von HK3.

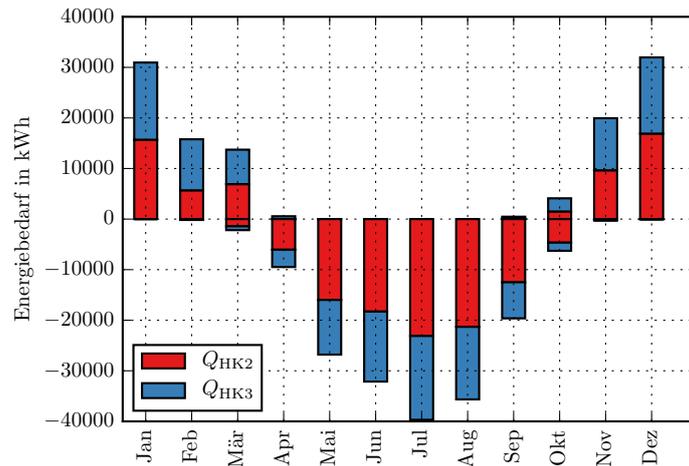


Abbildung 3.26: Monatlicher absoluter Energiebedarf der Niedertemperatur-Heizkreise 2 und 3 [28]

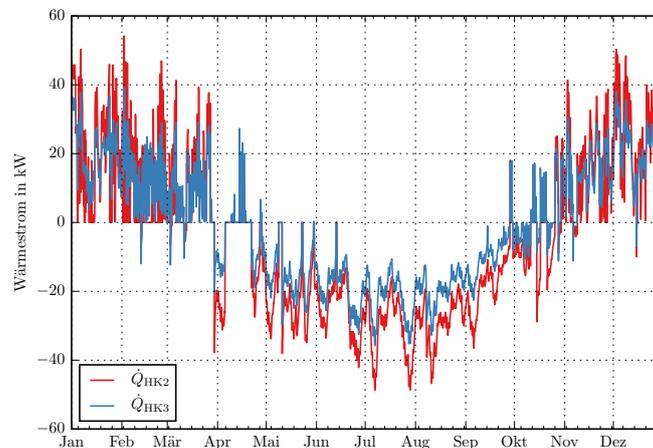


Abbildung 3.27: Jahresverlauf des stündlichen Wärmestrombedarfs der Niedertemperatur-Heizkreise 2 und 3 [28]

### 3.2.8 Verbesserte Betriebsstrategien für die thermische Bauteilaktivierung

Aufgrund der beschriebenen Probleme des Gebäudes bezüglich Überhitzung wurden Ansätze für eine verbesserte Betriebsstrategie anhand von Simulationen bewertet. Der Fokus liegt dabei auf der Betrachtung des Kühlfalls, da im Sommer die meisten Komfortverletzungen auftreten. Hierfür werden die Reaktionszeiten von SS und TABS untersucht sowie Ansätze für eine verbesserte Betriebsstrategie bewertet. Außerdem wird eine Übersicht der Verteilung von benötigter Heiz- und Kühlenergie auf die sieben konditionierten Gebäudezonen gegeben um zu evaluieren, ob ein Ausgleich zwischen gleichzeitig auftretendem Kühl- und Heizbedarf verschiedener Zonen möglich ist.

**Thermische Trägheit:** Um Ansätze für die Regelung von Bauteilaktivierung und Seitenstreifen der Heizkreise 2 und 3 der Niedertemperaturversorgung zu finden, wurde die thermische Trägheit der Flächenheizung bzw. -kühlung untersucht. Als Randbedingungen wird gewählt:  $T_{amb} = konst. = 26^{\circ}C$ ,  $T_{vl} = 18^{\circ}C$ ,  $LWR = konst. = 1.081/h$ ,  $\dot{Q}_{int} = konst. = 10.8W/m^2$ . Es wurden keine solaren Erträge berücksichtigt, da die

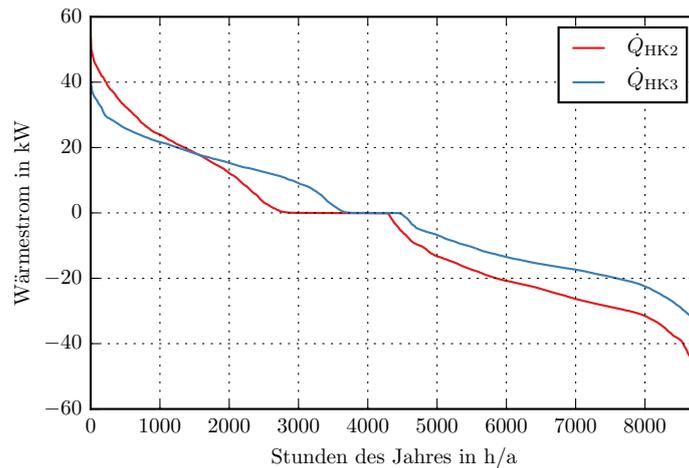


Abbildung 3.28: Geordnete Jahresdauerlinie des Wärmestrombedarfs der Niedertemperatur-Heizkreise 2 und 3 [28]

Stillstandstemperaturen ansonsten zu hohe Werte annehmen würden. Die konstant angeschalteten internen Gewinne kompensieren die fehlenden solaren Gewinne. Folgende Varianten wurden untersucht:

- Blau - Bauteilaktivierung wird aktiviert.
- Grün – Seitenstreifen werden aktiviert.
- Rot - TABS und SS aktiv.

Die Öffnung der Ventile erfolgt jeweils für 8 h und wird in Abbildung 3.29 unten aufgetragen. In der oberen Teilgrafik sind die Raumlufttemperaturen für die drei Fälle aufgetragen. Ohne Konditionierung ergibt sich eine Stillstandstemperatur von  $31.7^{\circ}\text{C}$ . Im mittleren Teil wird der spezifische Wärmestrom abgebildet, welcher von der Flächenheizung an den Raum abgegeben wird. Wird das Ventil geöffnet, tritt bei aktiven Seitenstreifen sofort eine Kühlwirkung ein. Bei den TABS wird nach 40 min der erste Kühleffekt sichtbar. Eine Reduktion der Raumlufttemperatur um  $0.2\text{ K}$  tritt bei den TABS genau eine Stunde nach den SS ein. Wird das Ventil geschlossen, erfolgt eine Halbierung der maximalen Leistung bei den SS nach 2.5 h. Bei der thermischen Bauteilaktivierung werden dafür 6.3 h benötigt. Eine Reduktion auf 20% der maximalen Leistung erfolgt bei den TABS erst nach 13 h, bei den Seitenstreifen nach 8.8 h. Der mittlere Teil von Abbildung 3.29 veranschaulicht auch die Dynamik der Kühlleistung von TABS und Seitenstreifen. Nach 8 h Aktivierung kommen die Seitenstreifen auf eine maximale Kühlleistung von  $6.4\text{ W/m}^2$ , wohingegen die TABS  $13.5\text{ W/m}^2$  erreichen. Bei gemeinsamem Betrieb werden  $18.6\text{ W/m}^2$  erzielt. Diese Werte beziehen sich auf die Nutzfläche der Zonen. Bezogen auf die Heizfläche von SS bzw. TABS ergeben sich maximale Kühlleistungen von  $128\text{ W/m}^2$  für SS,  $54\text{ W/m}^2$  für die TABS und  $62\text{ W/m}^2$  bei gemeinsamer Nutzung. Diese Betrachtung bildet jedoch eine extreme Situation ab, da die Temperaturspreizung bei einer Raumlufttemperatur von etwa  $29\text{ K}$  sehr hoch ist. [15] nennt für eine mittlere Vorlauftemperatur von  $20^{\circ}\text{C}$  bei einer Temperaturspreizung von  $0.5\text{~}2\text{ K}$  zwischen Vor- und Rücklauf eine mittlere Kühlleistung der TABS von  $20\text{~}25\text{ W/m}^2$  aus dem Monitoring-Projekten.

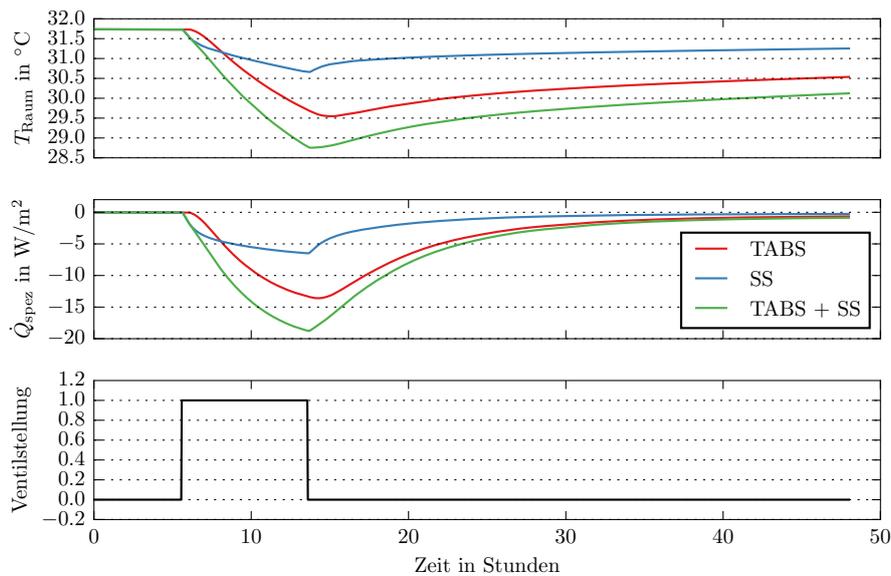


Abbildung 3.29: Thermische Trägheit von TABS und SS im Kühlfalls [28]

**Heiz- und Kühlbedarf – Zirkulationsmodus:** Zur Verbesserung des Nutzerkomforts im bestehenden Gebäude wurde der Gedanke verfolgt, einen Betriebsmodus zu implementieren, bei welchem keine Wärme- oder Kälteversorgung stattfindet, sondern das Fluid zwischen den Heizkreisen von TABS und SS zirkuliert. Damit soll der Kühlbedarf bei südlich orientierten Gebäudezonen durch Heizbedarf von Zonen mit nördlicher Ausrichtung kompensiert werden. Aufgrund dieser Überlegung wurde der Energiebedarf zur idealen Konditionierung der sieben Gebäudezonen simuliert. Dafür wurde das Simulationsmodell abgeändert um das reale in ein ideales Heiz- und Kühlsystem zu verwandeln. Die Konditionierung mittels Bauteilaktivierung wurde durch eine ideale Wärmezufuhr- und Abfuhr im 5H1C-Modell ersetzt. Dazu wurde das Modell `Modelica.Thermal.HeatTransfer.Sources.FixedTemperature` verwendet. Es bildet eine Wärmestromknoten ab, welcher durch unbegrenzte Wärmezufuhr- oder -abfuhr für eine konstante, definierbare Temperatur sorgt. Für die in Abbildung 3.30 gezeigte Auswertung wurde eine Raumlufttemperatur von  $23\text{ }^{\circ}\text{C}$  angenommen. Dies stellt eine Vereinfachung dar, da es ansonsten gängige Praxis ist, Temperaturen zwischen  $20$  und  $26\text{ }^{\circ}\text{C}$  zuzulassen. Aus der Abbildung geht hervor, dass im Frühjahr fünf und im Herbst lediglich vier Wochen auftreten, in denen gleichzeitig ein nennenswerter Kühl- und Heizbedarf auftritt. In diesen neun Wochen wird jedoch kein klares Gefälle zwischen den nördlich orientierten Zonen 1, 6 und 7 sowie den Südzone 3 und 4 deutlich. Da einem aufwändigen und kostenintensiven Umbau zur Umsetzung der vorgeschlagenen Betriebsoptimierung ein vergleichsweise geringer Nutzen gegenübersteht wird von der Implementierung einer solchen Strategie abgeraten.

**Heiz- und Kühlbedarf – allgemein:** Die in Abbildung 3.30 gezeigte Auswertung deutet auf eine ausgeglichene Bilanz zwischen Heiz- und Kühlbedarf hin. Um dies zu überprüfen, werden, basierend auf dem selben Simulationsmodell, zwei Varianten berechnet, bei denen die Temperatur der Zonen ideal auf  $20$  bzw.  $26\text{ }^{\circ}\text{C}$  gehalten wurde. Anschließend wird für  $T_{air,Zone} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$  der Heizbedarf und für  $T_{air,Zone} = 26\text{ }^{\circ}\text{C}$  der Kühlbedarf aufsummiert. Tabelle 3.5 zeigt die Ergebnisse dieser Analyse. Es wird deutlich, dass der Heizbedarf zur Konditionierung der sieben Zonen etwa zwei Drittel des Kühlenergiebedarfs beträgt. Es kann also nicht von einer ausgeglichenen Bilanz der geothermi-

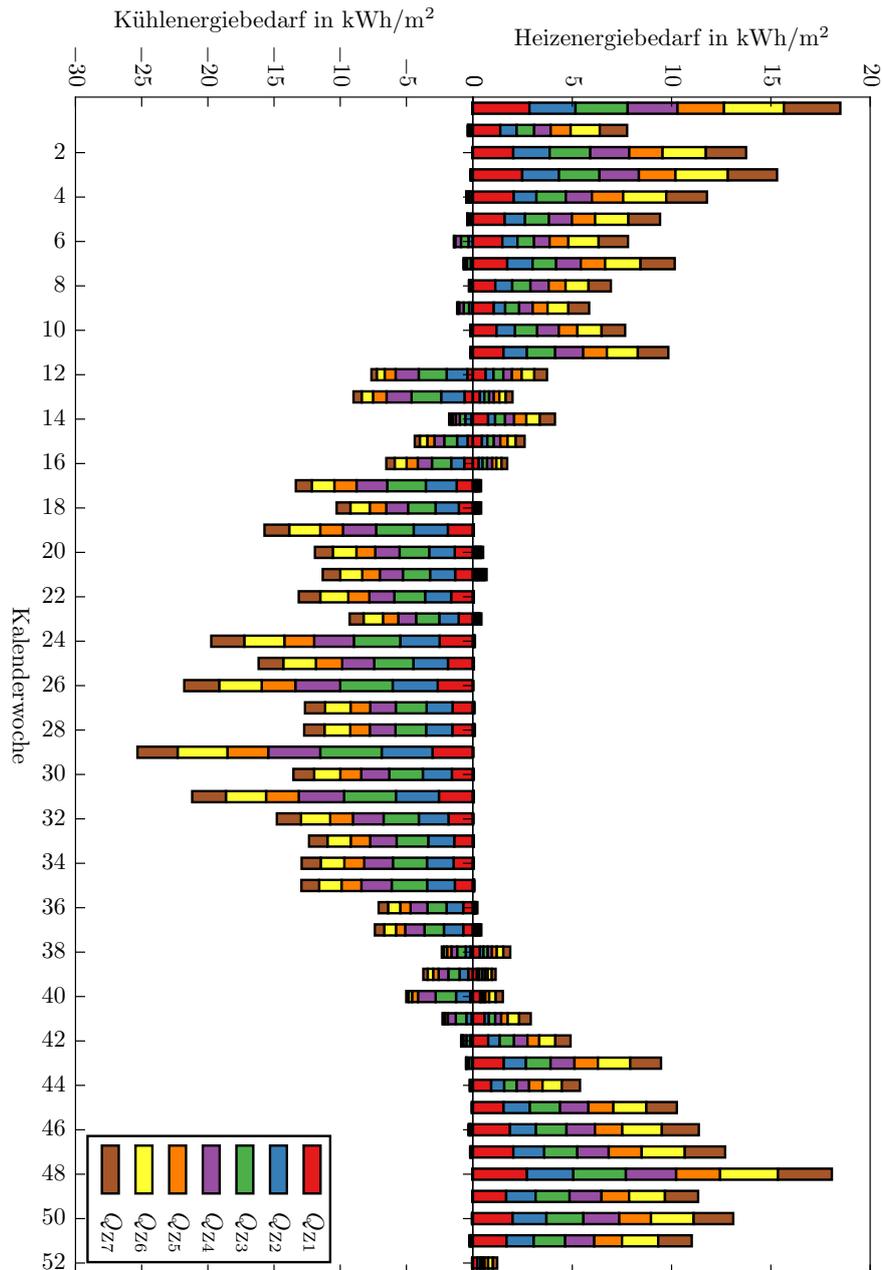


Abbildung 3.30: Wöchentlicher Heiz- und Kühlenergiebedarf der sieben Gebäudezonen [28]

schen Wärmeversorgung ausgegangen werden. Wird berücksichtigt, dass der Heizbedarf durch die der Wärmepumpe bei einem durchschnittlichen COP von 4 gedeckt wird, liegt die jährliche, für Heizzwecke dem Erdreich entzogene, Wärmemenge nur noch bei 83 440 kWh/a. Im Kühlmodus wird der Bedarf jedoch durch freie Kühlung ohne Hilfsenergie gedeckt. Außerdem werden im Sommer auch die RLT-Anlagen 1, 2, 3 und 5 mitversorgt. Dadurch ist langfristig eine Erwärmung des Erdreichs zu erwarten, welche durch nachströmende Wärme der Umgebung teilweise kompensiert werden kann. Es wird langfristig mit einer sinkenden Leistung des Systems zur Kühlung gerechnet.

Tabelle 3.5: Jahresenergiebedarf Heizung / Kühlung mit TABS und SS

	absolut Energiebedarf in kWh	spezifisch Energiebedarf in kWh/m <sup>2</sup> /a
Heizen	111253	19,7
Kühlen	-173363	-30,7

**Kühlbedarf – allgemein:** Für eine allgemeine Untersuchung der zonalen Verteilung des Kühlenergiebedarfs wurde das Simulationsmodell, wie in Abschnitt Heiz- und Kühlbedarf - Zirkulationsmodus beschrieben, angepasst. Die konstante Raumlufttemperatur wurde mit  $T_{air,Zone} = 26^{\circ}C$  definiert. Abbildung 5.24 zeigt den kumulierten Kühlenergiebedarf pro Simulationszone und Monat. In den Monaten Januar, Februar, November und Dezember treten vernachlässigbar geringe Mengen an Kühlenergiebedarf auf. Dieser wird in Realität durch eine häufigere und längere Fensterlüftung oder einen kurzzeitigen, geringfügigen Anstieg der Raumlufttemperatur ausgeglichen. Der Kühlbedarf in den Monaten März und Oktober ist ebenfalls gering und kommt durch einzelne Tage mit hohem Direktstrahlungsanteil und warmer Umgebungsluft zustande. Im oberen Teil von Abbildung 3.31 wird der absolute Kühlenergiebedarf jeder Zone in kWh dargestellt. Es wird deutlich, dass die Zonen 2, 3, 4 und 6 hier den Hauptanteil ausmachen, wobei Zone 6 die größte Nutzfläche sowie den höchsten Fassadenanteil aufweist und damit auch den größten Kühlenergiebedarf besitzt. Der untere Teil der Abbildung zeigt den spezifischen Energiebedarf bezogen auf die Nutzfläche. Es zeigt sich, dass die Zonen 2 und 3 den höchsten spezifischen Bedarf aufweisen. Zone 2 bezieht in den Morgenstunden bei einem hohen Direktstrahlungsanteil hohe solare Erträge, welche mit den Nutzungsstunden des Gebäudes zusammenfallen. Zone 3 weist den höchsten Fensterflächenanteil bezogen auf die Nutzfläche auf und besitzt deshalb auch den höchsten spezifischen Kühlbedarf. Zone 4 und Zone 6 weisen einen ähnlichen spezifischen Kühlbedarf auf obwohl Zone 4 nach Süden, Zone 6 jedoch nach Norden orientiert ist. Zone 6 besitzt jedoch einen deutlich höheren Fensterflächen- und Fassadenanteil bezogen auf seine Nutzfläche. Die Auswertung des relativen Energiebedarfs zeigt auch, dass Wärmeeinträge durch direkte Solarstrahlung nicht den dominierenden Anteil der Wärmelasten ausmachen. Diffuse solare Gewinne und innere Wärmequellen sorgen auch bei den nördlich orientierten Zonen für einen hohen Kühlbedarf. Transmissionswärmelasten durch Fenstern und außenliegende Wände spielen eine untergeordnete Rolle da die Temperaturdifferenz zwischen Umgebung und Zonen nur selten über  $26^{\circ}C$  liegt. Werden Zustände mit  $\Delta T_{amb>26} = (T_{amb} - T_{zone}) > 26$  aufsummiert, ergeben sich  $225 Kh$ . Dies ergibt für Zone 6 einen jährlichen Wärmeeintrag durch Transmission der Fenster von  $110.3 kWh$  und für die opake Fassade von  $26.7 kWh$ . Als Vergleichswert wird der Wärmegewinn durch interne Lasten der Zone 6 eines Tages herangezogen, welcher auf  $38.1 kWh$  beziffert werden kann.

**Kühlbedarf - tageszeitliche Verschiebungen:** Eine Einteilung der Simulationszonen des Gebäudes nach der Orientierung der Fassaden wurde vorgenommen. Demzufolge weist Zone 2 eine südöstliche und Zone 5 eine westliche Ausrichtung auf. Es soll untersucht werden, ob eine tageszeitliche Verschiebung der Kühlleistungen erkennbar ist. Zusätzlich sollen Indikatoren für das Auftreten dieser Verschiebung identifiziert werden. Würden klare Verschiebungen deutlich und ließen sich diese anhand von messbaren Größen quantifizieren, könnte eine neue Regelungsstrategie implementiert werden. Das Verhältnis der Massenströme und Mengen an Kühlenergie könnte entspre-

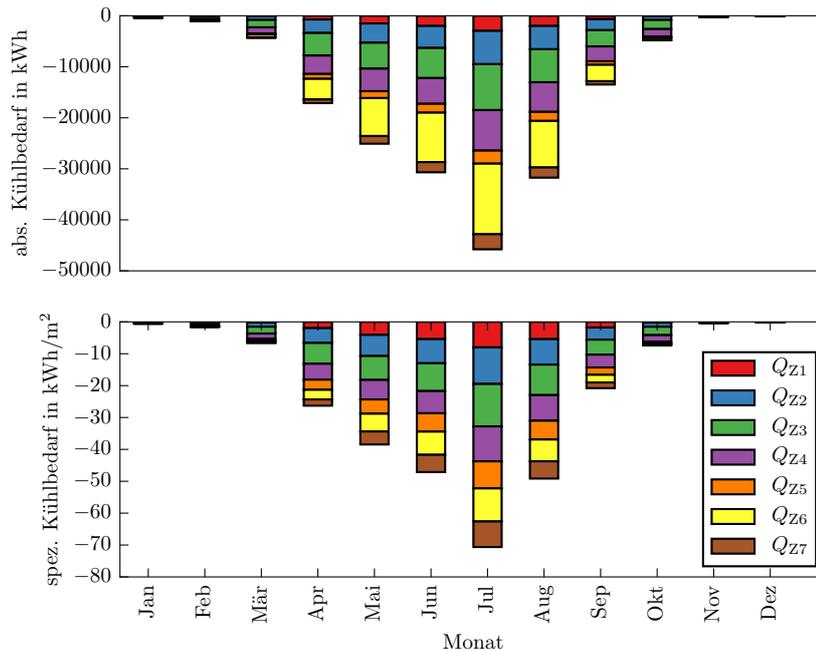


Abbildung 3.31: Monatlicher, absoluter und relativer Kühlenergiebedarf der Gebäudezonen [28]

chend der Simulationsergebnisse tageszeitlich angepasst werden. Um diese Fragestellungen beantworten zu können, wird das Simulationsmodell, wie in Abschnitt Heiz- und Kühlbedarf - Zirkulationsmodus beschrieben, angepasst. Die konstante Raumlufttemperatur wird mit  $T_{air,Zone} = 26^{\circ}C$  definiert. Es werden drei Tage im Zeitraum 04.07. – 08.07. identifiziert, bei welchen klar unterscheidbare meteorologische Bedingungen herrschen. Abbildung 3.32 zeigt in der linken Spalte einen sonnigen Tag mit Umgebungstemperaturen zwischen 15 und  $26^{\circ}C$  sowie einem hohen Ertrag an direkter Solarstrahlung.

Die mittlere Spalte zeigt einen Tag mit Bewölkung und geringem Direktstrahlungsanteil. Rechts ist ein Tag mit vollständiger Bedeckung zu sehen, wobei die Diffusstrahlung gleich der Globalstrahlung ist und lediglich Werte bis  $240 W/m^2$  einnimmt. Die Außentemperatur unterliegt dabei einer geringen Spreizung und lässt keine Tag/Nacht-Dynamik erkennen. In der obersten Reihe der Abbildung wird der spezifische Kühlleistungsbedarf der beiden Gebäudebereiche mit südöstlicher bzw. westlicher Orientierung aufgetragen.

Am sonnigen und am wolkeigen Tag wird eine Tag/Nacht-Dynamik erkennbar. Am Tag mit Bedeckung werden bis 8 Uhr gespeicherte Wärmemengen des Vortags abgekühlt. Dann setzt die Lüftung bzw. Infiltration mit kühler Umgebungsluft bei einer Luftwechselrate von  $1.08 1/h$  ein, wodurch die Raumlufttemperatur verringert und der Kühlbedarf deutlich reduziert wird.

Am sonnigen Tag tritt um 8 Uhr eine Senkung des Kühlbedarfs durch die einsetzende Lüftung mit Umgebungsluft bei  $19^{\circ}C$  ein. Um 18 Uhr sinkt der Bedarf an Kälte deutlich obwohl die Luftwechselrate zu diesem Zeitpunkt von  $1.08$  auf  $0.1081/h$  reduziert wird. Dieser Effekt ist abends jedoch geringer, da die Temperaturdifferenz zwischen  $T_{air,zone}$  und  $T_{amb}$  lediglich  $1 K$  beträgt. Gleichzeitig sinken die inneren Wärmequellen, welche

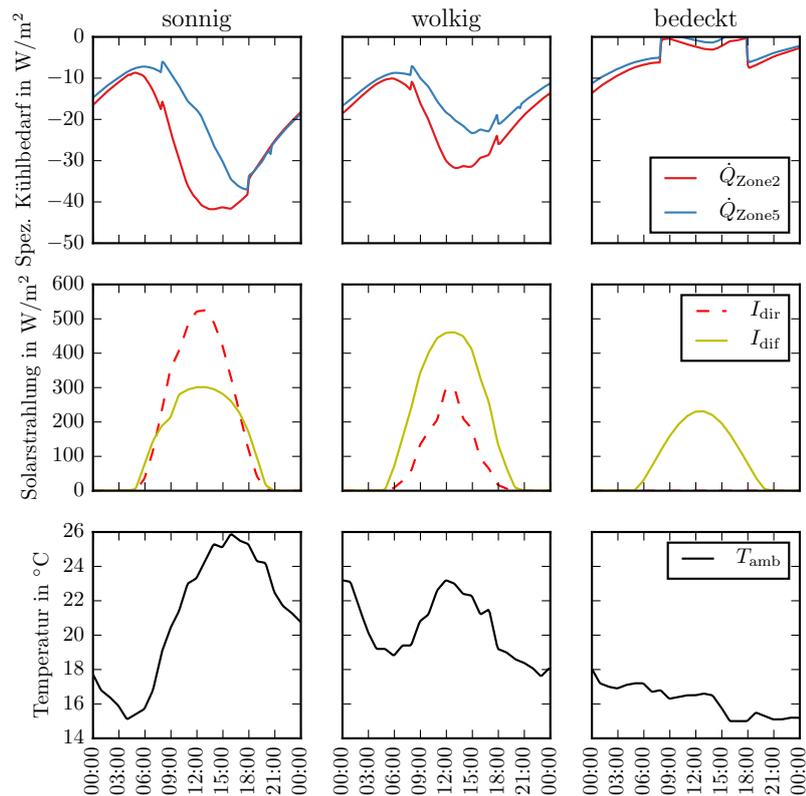


Abbildung 3.32: Spez. Kühlbedarf der Zonen 2 und 5 für drei Tage bei keiner, geringer bzw. vollständiger Bedeckung [28]

von 8 bis 18 Uhr  $10 \text{ W/m}^2$  betragen, auf  $2 \text{ W/m}^2$ , wodurch die Kühllast stufenartig stark sinkt.

Am wolkgigen Tag wirkt sich die Reduzierung von internen Lasten und Luftwechselln um 18 Uhr dahingehend aus, dass sich der Kühlleistungsbedarf erhöht, da die Kühlung durch Umgebungsluft mit  $19.5^\circ\text{C}$  entfällt. Wird nun der Kühlleistungsbedarf der beiden Zonen 2 und 5 verglichen, kann festgestellt werden, dass dieser am sonnigen Tag für Zone 2 bereits ab 6 Uhr ansteigt, bei Zone 5 jedoch erst gegen 9 Uhr wieder größer wird. Ihren maximalen Wert erreichen die Zonen dann um 15 bzw. 18 Uhr. Es lässt sich eine Verschiebung um  $3 \text{ h}$  ableiten.

Am bewölkten Tag ist dieser zeitliche Versatz ebenfalls sichtbar, die maximale Kühlleistung tritt hier um 13 bzw. 15 Uhr auf, woraus eine Verschiebung um  $2 \text{ h}$  resultiert. Um die soeben angestellte qualitative Analyse besser quantifizieren zu können, werden die Kälteleistungen der beiden Zonen ins Verhältnis gesetzt. Zusätzlich wird ein Verhältnis von Direkt- zu Diffusstrahlung gebildet. In Abbildung 3.33 werden diese beiden Kennzahlen für die drei beschriebenen Tage aufgetragen. Am sonnigen Tag treten bei Strahlungsverhältnissen zwischen 0.5 und 1.8 Kühlleistungsverhältnisse zwischen 1.2 und 2.7 auf.

Am wolkgigen Tag liegen die Minima bei 1.2 bzw. 0 und die Maxima bei 1.65 bzw. 0.6. Am bewölkten Tag lassen sich keine Korrelationen bilden, da die Direktstrahlung ausbleibt. Die Kühlleistung wird somit nicht von den solaren Erträgen dominiert und verhält

sich nicht proportional zu diesen. Es kann ein Zusammenhang zwischen den beiden Verhältnissen gesehen werden. Für eine einfache prädiktive Regelung wäre es folglich ausreichend, den Bedeckungsgrad des kommenden Tages vorherzusagen. Anhand dieses Faktors könnte die Beladung der TABS von Zone 2 und 5 erfolgen. Zone 2 weist generell einen höheren spezifischen Kühlbedarf auf, da sie einen Fensterflächenanteil von 40% besitzt, wohingegen Zone 5 lediglich 31% aufweist. Darüber hinaus ist das Verhältnis von Fensterfläche zu Nutzfläche bei Zone 2 höher.

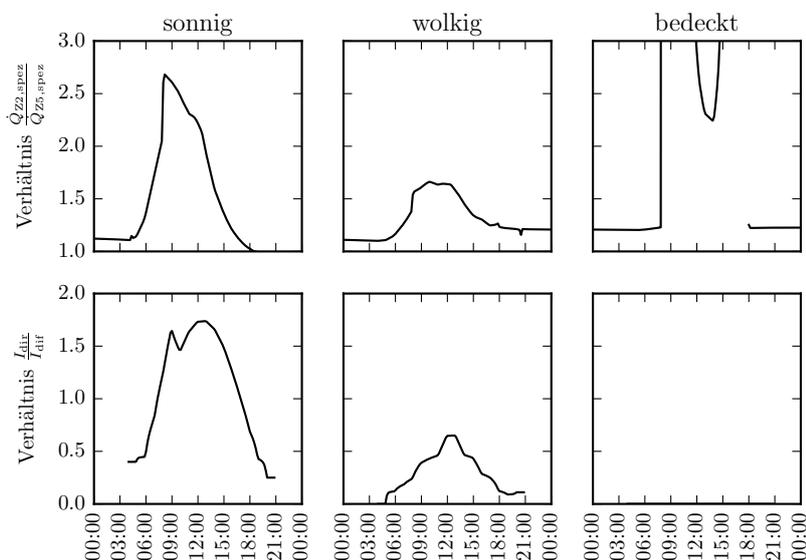


Abbildung 3.33: Verhältnis von Kühlleistungsbedarf Zone 2 / Zone 5 und Solarstrahlung Direkt / Diffus für drei Tage bei keiner, geringer bzw. vollständiger Bedeckung [28]

### 3.2.9 Optimierung von Betriebsparametern

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der in 3.2.2 vorgestellten Methode zur Optimierung von Betriebsparametern beschrieben. Für das reale Gebäude existieren elementare Probleme bezüglich der Regelung und Betriebsführung der Bauteilaktivierung. Dabei kommt es, wie beschrieben, zu starken Komforteinbußen durch sommerliche Überhitzung. Daher werden an dieser Stelle Optimierungspotentiale in diesem Bereich untersucht, da hier das größte Potential zur Steigerung des Komforts gesehen wird. Es werden ein Referenzmodell sowie vier Varianten gebildet. Jede Variante definiert sich durch eine Anzahl voneinander unabhängiger Parameter, welche mit GENOPT® optimiert werden. Anschließend werden die Ergebnisse anhand der Kostenfunktion verglichen. Die Referenzvariante entspricht dem beschriebenen Gebäudezonenmodell mit Bauteilaktivierung und Seitenstreifen. Es wurde die in Gleichung (3.13) beschriebene Kostenfunktion  $f(x)$  definiert, welche auf alle Varianten angewandt wird. Dabei gibt  $T_i$  (3.14) die absolute Temperaturdifferenz zwischen Raumlufttemperatur der Zone  $i$  und des definierten operativen Temperaturbereichs an.  $T_{Zone,C}$  ist die in [10] definierte Komfortraumtemperatur.

$$f(x) = \sum_{i=1}^7 \int_0^{8760} \Delta T_i dt \quad (3.13)$$

$$\Delta T_i = \begin{cases} T_{\text{Zone,C}} - 2 - T_i & \text{für } T_i < T_{\text{Zone,C}} - 2 \\ T_i - T_{\text{Zone,C}} - 2 & \text{für } T_i > T_{\text{Zone,C}} + 2 \end{cases} \quad (3.14)$$

Es werden vier Varianten mit zu variierenden Parametern gewählt, welche als vielversprechend für die Optimierung der Kostenfunktion gelten. Als Ausgangspunkt werden die Ergebnisse der Referenzvariante betrachtet (siehe Abbildung 3.34). Dabei wird deutlich, dass in den Zonen 2, 3 und 4 eine hohe Anzahl von Komfortverletzungen durch Überhitzung auftritt. In diesen Zonen wird lediglich zu 60% der Nutzungszeit die Komfortkategorie 1 erfüllt. Aufgrund dieser Feststellung werden Simulationsparameter identifiziert, welche einen vermeintlich hohen Einfluss auf die Raumlufttemperatur haben. Tabelle 3.6 zeigt die Varianten, ihre zu variierenden Parameter sowie die Referenz- und Optimalwerte.

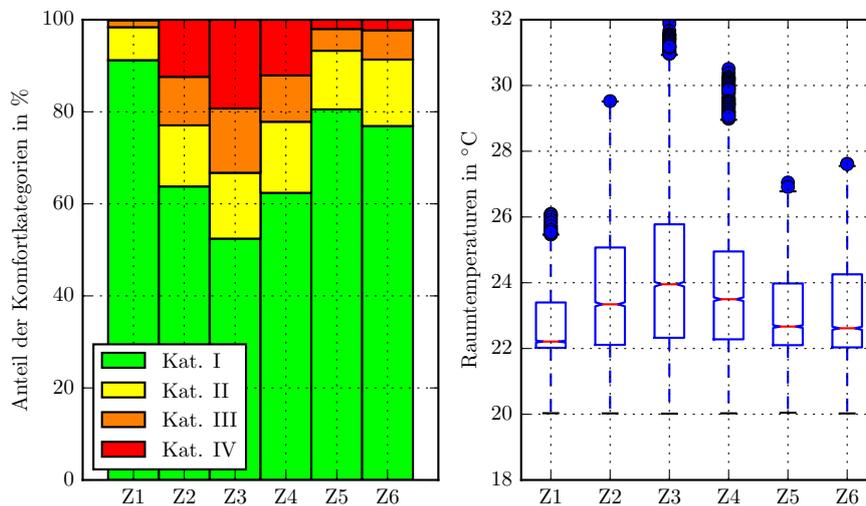


Abbildung 3.34: Auswertung der Raumlufttemperaturen aller Gebäudezonen der Referenzsimulation nach DIN EN 15251 [28]

Es wurde der hybride Algorithmus GPS mit PSO (Bezeichnung in GENOPT®: GPSPS-OCCHJ) verwendet. Für Variante 4 wurde das Modell um einen prädiktiven Ansatz für die Entscheidung Heizen / Kühlen erweitert. Dabei wird anstelle des 24 h-Mittelwerts der Außenlufttemperatur ein  $T_{\text{amb,av,fict}}$  verwendet, welche sich aus einer, wie in Gleichung (3.15) beschriebenen, Addition dreier Faktoren zusammensetzt.

$$T_{\text{amb,av,fict}} = T_{\text{amb,av,24h}} + f_{\text{irr}} I_{\text{glob,hor,präd,av,6h}} + f_{\text{irr,24h}} I_{\text{glob,hor,präd,av,24h}} \quad (3.15)$$

Mithilfe der in Tabelle 3.6 aufgeführten optimierten Parameter ergeben sich die in Tabelle 3.7 genannten Ergebnisse der Optimierungsvarianten. Es wird deutlich, dass die Varianten 1 und 4 zu einer Reduktion der Komfortverletzungen um 89.5 bzw. 91.7% des Referenzwertes führen. Die Varianten 2 und 3 haben nur geringe Verbesserungen von etwa 1.5 bzw. 4.3% zur Folge. Der Mehraufwand an benötigter Kühlenergie beträgt bei Variante 4 6.4% bezogen auf den Referenzwert. Gleichzeitig wird der Heizenergiebedarf um 3.6% reduziert.

Tabelle 3.6:  
Parameter der Varianten mit ursprünglichen und optimierten Werten

	Optimierungsparameter	Referenzwert	Optimierter Wert	Einheit
Variante 1	$T_{lim,heat}$	10,0	7,843 75	°C
	$T_{lim,cool}$	12,0	7,875	°C
Variante 2	$p_{Range}$	0,1	0,1125	-
Variante 3	$T_{flow,max,heat,Süd}$	30,0	29,626	°C
	$T_{flow,min,heat,Süd}$	26,4	26,626	°C
Variante 4	$T_{lim,heat}$	10,0	8,0	°C
	$T_{lim,cool}$	12,0	8,0	°C
	$f_{Irr}$	0,0	3,5	-
	$f_{Irr,24h}$	0,0	2,0	-

Tabelle 3.7: Kostenfunktion sowie Heiz- und Kühlbedarf der Optimierungsvarianten

	Ergebnis der Kostenfunktion	Heizbedarf	Kühlbedarf
	in Kh	in kWh	in kWh
Referenz	3921	117041	183926
Variante 1	410	113256	194058
Variante 2	3861	117032	183500
Variante 3	3753	117060	183791
Variante 4	325	112863	195783

Abbildung 3.35 zeigt die Auswertung der Raumlufttemperaturen nach DIN EN 15251 für Variante 4. Ein Vergleich mit Abbildung 3.34 zeigt, dass die Maximaltemperaturen der Zonen 2, 3 und 4 deutlich reduziert werden konnten. Traten vorher für diese Zonen in 12~19% der Fälle starke Komfortverletzungen auf (Kategorie 4), können diese nun auf 8 bzw. 4% reduziert werden. Am Beispiel von Zone 3 kann gezeigt werden, dass für Umgebungstemperaturen im Bereich 5~15°C für die Referenzvariante Temperaturen bis 32°C auftreten (siehe Abbildung 3.36). In der optimierten Variante 4 können die Temperaturen unter 29°C gehalten werden (siehe Abbildung 3.37).

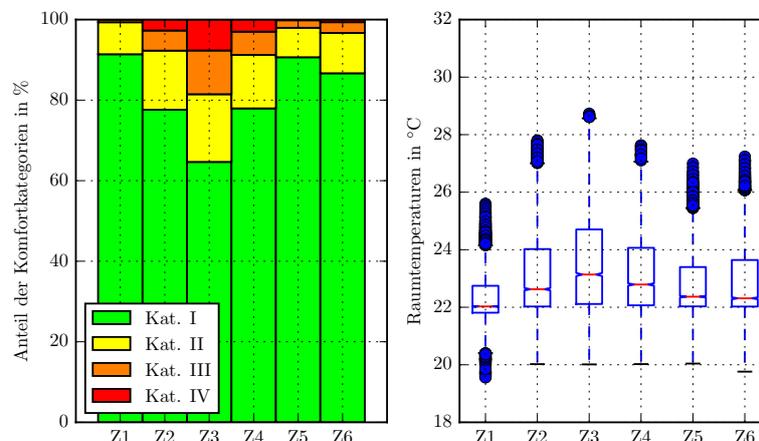


Abbildung 3.35: Auswertung der Raumlufttemperaturen aller Gebäudezonen der Optimierungsvariante 4 nach DIN EN 15251 [28]

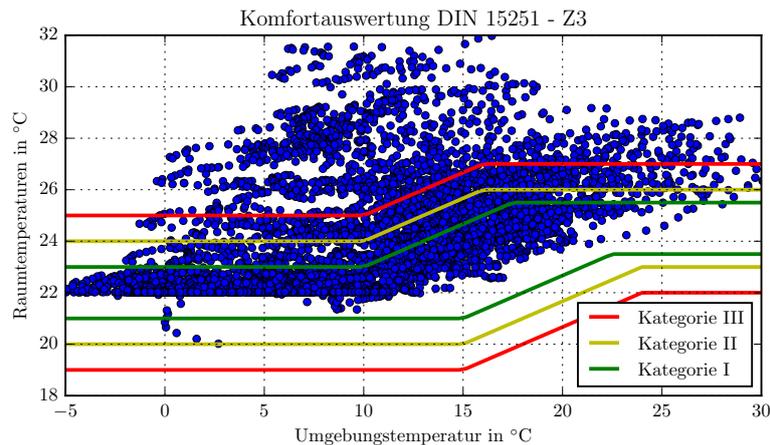


Abbildung 3.36: Verteilung der Raumlufttemperatur von Zone 3 über die Umgebungstemperatur der Referenzvariante [28]

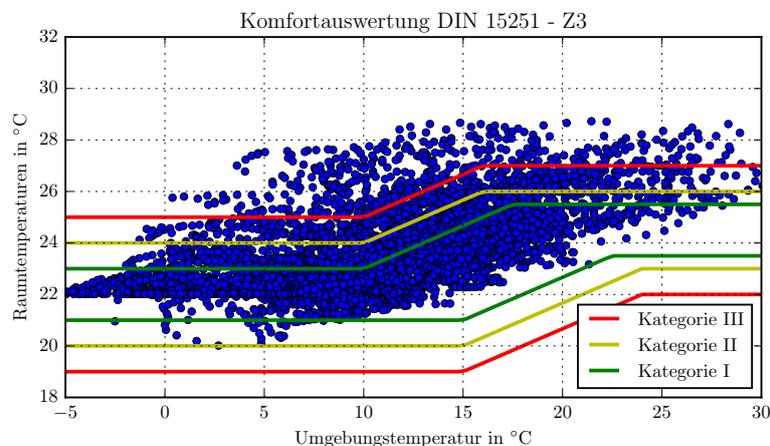


Abbildung 3.37: Verteilung der Raumlufttemperatur von Zone 3 über die Umgebungstemperatur für Variante 4 [28]

### 3.2.10 Fazit und Ausblick

**Modellbildung:** Wie jedes andere Simulationsmodell auch, geben die Modelle zur Abbildung der Nieder- und Hochtemperaturwärmeversorgung die realen Bedingungen nur begrenzt wieder. Es müssen sinnvolle Vereinfachungen getroffen werden, um die Komplexität auf ein Mindestmaß zu reduzieren. Die Module zur Abbildung der Wärmeerzeuger BHKW, Kessel und Wärmepumpe werden als idealisierte Wärmequellen abgebildet. Die Wärmeübertragungsvorgänge dieser Komponenten sowie ihre Regelung werden stark vereinfacht dargestellt. Dies hat zur Folge, dass die simulierten Rücklauftemperaturen dieser Komponenten weniger stark fluktuieren als die gemessenen. Es werden jedoch keine negativen Folgen dieser Vereinfachung auf die Gültigkeit des Modells erkennbar. Die genannten Vereinfachungen führen jedoch dazu, dass keine Bewertung der Wärmeerzeugung vorgenommen werden kann. Der COP der Wärmepumpe oder Wirkungsgrade von BHKW und Kessel werden nicht abgebildet. Dadurch ist es nicht möglich, Änderungen am System anhand dieser Kenngrößen zu bewerten. Die Anpassung der Vorlauftemperatur der Wärmepumpe an das benötigte Temperaturniveau könnte andernfalls anhand der Steigerung des COP der Wärmepumpe bewertet werden.

Die Abbildung der Umwälzpumpen in den Erzeugerkreisen erfolgt durch ein Pumpenmodell mit idealer Massenstromregelung. Bei Änderungen der Druckverluste der Verbraucherkreise kommt es nicht zu Änderungen des Massenstroms, da das Pumpenmodell mithilfe einer Druckerhöhung für einen definierbaren Massenstrom sorgt. Diese Vereinfachung des Modells erscheint jedoch vertretbar, da die hydraulischen Schaltungen durch Pufferspeicher (HT) und Bypass (NT) keine hohen Druckänderungen zulassen. Dies wird bestätigt durch die geringen Streuungen der Messdaten von  $\dot{m}_{BHKW}$ ,  $\dot{m}_{Kessel}$  und  $\dot{m}_{WP}$ , welche der statistischen Auswertung in Abbildung 3.15 entnommen werden können. Die Modellierung der Wärmesenken im HT-System erfolgte unter Vernachlässigung von veränderlichen Größen wie dem Massenstrom oder den Temperaturniveaus. Es können keine negativen Einflüsse dieser Vereinfachung auf die Gültigkeit des Modells für diese Arbeit festgestellt werden.

Wie Abschnitt 3.2.4 entnommen werden kann, werden die Ausgangsgrößen der Simulationsmodelle durch eine Vielzahl von Parametern beeinflusst. Die Werte der Parameter werden entweder anhand von Herstellerinformationen, aus Literaturangaben oder durch die Auswertung von Messdaten generiert. An dieser Stelle sollen nur einzelnen Parameter diskutiert werden. Der Einfluss der Luftwechselrate auf den Energiebedarf der sieben simulierten Gebäudezonen ist hoch, da die Lüftung über offenbare Fenster ohne Wärmerückgewinnung erfolgt. Es wurden Werte nach Norm verwendet. Die tatsächlich auftretenden Luftwechselraten können nicht gemessen und nur schwer abgeschätzt werden, da sie abhängig von den Nutzern, der Temperaturdifferenz zwischen Raum und Umgebung sowie den Druckverhältnissen aufgrund der Umströmung des Gebäudes sind. Die Parameter  $\dot{Q}_{int,min}$  und  $\dot{Q}_{int,max}$  geben die spezifischen internen Wärmegewinne zur Berechnung der Wärmeströme in den Gebäudezonen an. Hohe Werte reduzieren den Wärmebedarf während der Heizperiode und erhöhen den Kühlenergiebedarf im Sommer.

**Optimierungen:** In Kapitel 3.2.6 werden zwei Sachverhalte herausgegriffen, welche Potential für eine Optimierung der Anlage bieten. Es wird beschrieben, dass die Versorgung der NT-Heizkreise durch die Wärmepumpe mit zu hohen Temperaturen erfolgt. Die Vorlauftemperatur der Wärmepumpe liegt dabei  $4 - 7\text{ K}$  über der geforderten Temperatur der Heizkreise. Dadurch kommt es zu einer Verschlechterung des COP der WP, da diese so bei einer höheren Verflüssigungstemperatur betrieben werden muss. Die hohen Vorlauftemperaturen der WP führen dazu, dass die Zirkulationspumpen der Heizkreise ein Vielfaches der minimal nötigen Massenströme transportieren. Eine exergetische Bewertung dieses Mehraufwands könnte durch die Bildung und den Vergleich von energetischem und exergetischem Wirkungsgrad erfolgen, wie er in [39] verwendet wird. Ob die Senkung der Verflüssigungstemperatur möglich ist, konnte nicht endgültig geklärt werden. Eine einfach umsetzbare Maßnahme ist die Senkung der Pumpendrehzahl für die Pumpen P16 und P17, was technisch machbar ist [13]. Dies erscheint sinnvoll, da die durchschnittliche Temperaturdifferenz zwischen Vor- und Rücklauf der Heizkreise nur  $0.9\text{ K}$  für HK2 bzw.  $2.1\text{ K}$  für HK3 beträgt. Wird die Drehzahl der Pumpen gesenkt, sinkt die Rücklauftemperatur. Dies führt wiederum zu einer niedrigeren Rücklauftemperatur des Heizkreisverteilers. Damit würde die mittlere Verflüssigungstemperatur weiter sinken und der COP steigen.

Der Abschnitt 3.2.8 zeigt Ergebnisse zu Untersuchungen für verbesserte Betriebsstrategien zur Regelung der TABS. Dabei können wertvolle Erkenntnisse zur thermischen Trägheit des Systems gewonnen werden. Diese können bei der Implementierung einer neuen Regelstrategie helfen, da sie Aufschlüsse über die zeitliche Verzögerung des

Systems liefern. Außerdem wird die Implementierung eines Zirkulationsmodus diskutiert. Dieser könnte anstelle eines Heiz- oder Kühlbetriebs angewandt werden, wenn in Zonen mit wenig solaren Erträgen Heizbedarf und in Zonen mit hoher solarer Einstrahlung Kühlbedarf bestünde. Es wurden der wöchentliche Heiz- und Kühlbedarf von sieben definierten Gebäudezonen bei einer idealen Heizung und Kühlung untersucht. Die wöchentliche Auflösung zeigt keine Potentiale für den Zirkulationsmodus. Ob bei einer täglichen Auflösung Zustände identifiziert werden könnten, die einen Zirkulationsbetrieb rechtfertigen würden, wurde nicht weiter verfolgt, da das Potential zu gering erscheint. In einer weiteren Untersuchung wird geprüft, inwiefern eine tageszeitliche Verschiebung von Kühllasten zwischen östlich und westlich orientierten Zonen auftritt. Dafür wurde der Kühlenergiebedarf für die Zonen 2 und 5 für einen sonnigen, einen wolkigen und sowie einen bedeckten Tag betrachtet. Es konnte ein klarer Zusammenhang zwischen dem Verhältnis von Direkt- zu Diffusstrahlung und dem Verhältnis des Wärmebedarfs der beiden Zonen hergestellt werden. Demzufolge kann mithilfe einer zuverlässigen Vorhersage des Bedeckungsgrades das Verhältnis der Beladung der TABS für diese beiden Zonen festgestellt werden. Da durch die Speicherkapazität der TABS eine hohe zeitliche Verzögerung vorhanden ist (siehe Abschnitt Thermische Trägheit in Kapitel 3.2.8), kann die Strategie nur umgesetzt werden, wenn der Bedeckungsgrad für mehr als 6 h vorhergesagt werden kann. Die Implementierung einer Regelstrategie, welche die hier gewonnenen Erkenntnisse berücksichtigt, kann Teil weiterer Simulationen des Zonenmodells mit TABS sein. Dabei kann der thermische Komfort als Bewertungskriterium verwendet werden. Welchen Einfluss unsichere Wettervorhersagen auf den Nutzerkomfort haben, kann ebenfalls untersucht werden. Die technische, hydraulische Umsetzung des Ansatzes ist noch zu klären.

In Abschnitt 3.2.9 werden vier numerische Optimierungen von Betriebsparametern durchgeführt. Die verwendete Kostenfunktion berücksichtigt nicht den Energieverbrauch des Systems. Zwar ist der Mehraufwand an Energie zur Heizung und Kühlung durch die optimierten Varianten gering, er könnte jedoch in die Kostenfunktion eingehen, um eine Balance zwischen Komfortverbesserung und Energieverbrauch herzustellen. Die Betrachtung des Parameters  $p_{Range}$  ergab keine signifikanten Verbesserungen. Folglich ist es besser, die TABS-Ventile nicht als Drosselventile, sondern wie bisher implementiert als Absperrventile zu betreiben. Variante 3 optimiert die Heizkurve von HK2, welcher die nach Süden orientierten Zonen versorgt. Die optimierte Variante weist eine geringe Abweichung von der Referenzheizkurve auf. Damit kann bestätigt werden, dass die im realen Gebäudebetrieb implementierte Heizkurve gut eingestellt ist und keiner weiteren Anpassung bedarf. Durch die Absenkung der Parameter  $T_{lim,heat}$  und  $T_{lim,cool}$  auf Werte um  $8^\circ C$  kann eine enorme Steigerung des Nutzerkomforts erzielt werden. Dieser Ansatz lässt sich im realen Gebäude durch die Anpassung der beiden Grenzwerte leicht umsetzen. Abbildung 3.38 zeigt die Auswertung von Außentemperatur und Betriebsmodus der Wärmepumpe für den Zeitraum Januar bis Juni 2015. Es wird deutlich, dass bei einer Betrachtung des Mittelwerts der letzten 48 h erst bei Temperaturen über  $15^\circ C$  in den Kühlmodus umgeschaltet wird. Demnach ist es nicht verwunderlich, dass es bisher zu den in Abbildung 3.2 gezeigten Überhitzungen der Gebäudezone kam.

Variante 4 berücksichtigt zusätzlich zur Umgebungstemperatur die prognostizierte solare Strahlung als Parameter für die Definition des Betriebsmodus der Wärmepumpe. Die so erzielten Verbesserungen gegenüber der Variante 1 sind nicht hoch. Vermutlich bietet eine modellprädiktive Regelung wie bei [12] und [35] Steigerungspotential für den Betrieb der TABS.

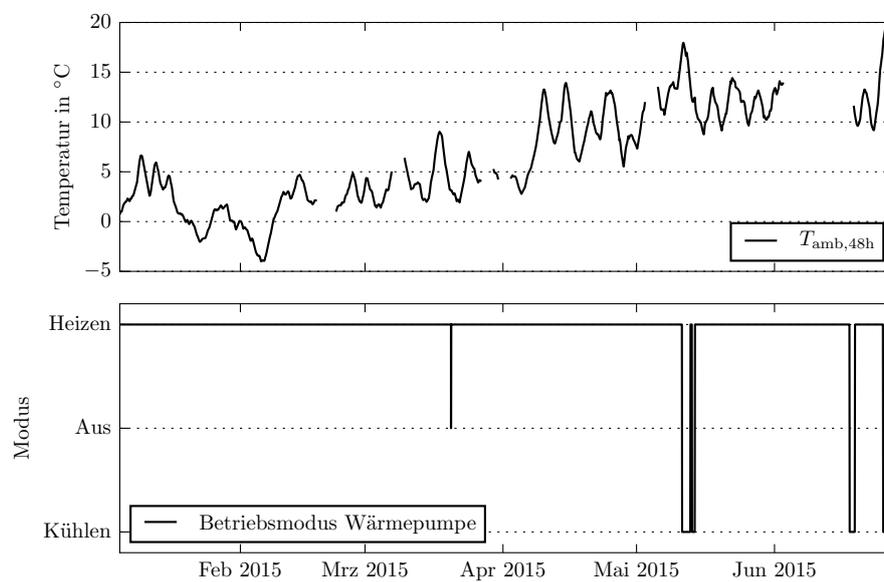


Abbildung 3.38: Gemittelte Umgebungstemperatur und Betriebsmodus der Wärmepumpe [28]

### 3.3 Berücksichtigung von Unsicherheiten in Wetterprognosedaten

Für die Regelung der Wärme- und Kälteversorgung von Gebäuden werden zunehmend modellbasierte Methoden eingesetzt, bei welchen Prädiktionen der Umgebungs- und Randbedingungen wie z.B. Außentemperatur, Solarstrahlung oder Personenbelegung berücksichtigt werden (siehe Abbildung 3.39). Ziel dieser Methoden ist es, den Energiebedarf zu reduzieren bzw. den thermischen Komfort zu verbessern. Die notwendigen Prädiktionen sind dabei mit Unsicherheiten behaftet. In diesem Arbeitspaket wurde daher untersucht, welchen Einfluss diese Unsicherheiten zum einen auf die Identifikation optimaler Regelungsparameter und zum anderen auf die erreichte Regelgüte während des Betriebs haben.

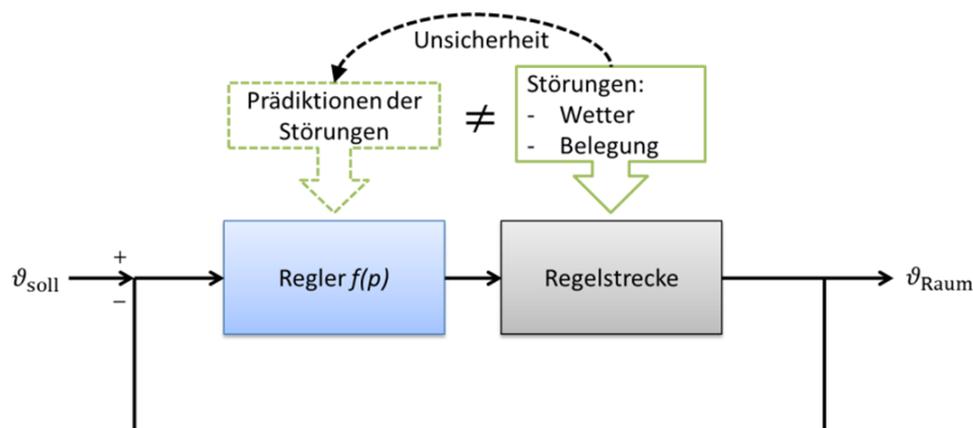


Abbildung 3.39: Schematische Darstellung der modellbasierten optimalen Regelung der Raumtemperatur unter Unsicherheiten

Für die Untersuchung wurde ein bestehendes Simulationsmodell eines mit TABS versorgten Raumes des Gebäudes KPB Mettmann angepasst. Die Regelung der TABS erfolgt auf Basis von (prädiktiven) außentemperatur- und solarstrahlungsgeführten Heizkurven der Form:

$$\vartheta_{VI} = \vartheta_{offset} - m_{\vartheta_{amb}}(\vartheta_{amb} - \vartheta_{norm}) - m_{G_{Sol}}(G_{Sol} - 0) , \quad (3.16)$$

mit:

- $m_{\vartheta_{amb}}$  Steigung der Heizkurve bezüglich der Außentemperatur,
- $m_{G_{Sol}}$  Steigung der Heizkurve bezüglich der Solarstrahlung,
- $\vartheta_{norm}$  Normaußentemperatur ( $-10^{\circ}C$ ),
- $\vartheta_{offset}$  Offset der Heizkurve.

Auf Basis des Modells wird untersucht wie sich veränderte Randbedingungen (Außentemperatur, Solarstrahlung und Belegung) während des Betriebs gegenüber den angenommenen Randbedingungen für die modellbasierte Parameteridentifikation auswirken. Hierfür wurden zwei unterschiedliche methodische Ansätze implementiert (siehe Abbildung 3.40).

**Variante A:** Die optimalen Regelungsparameter werden unter Berücksichtigung einer vorgegebenen Häufigkeitsverteilung der Randbedingungen identifiziert. Das bedeutet,

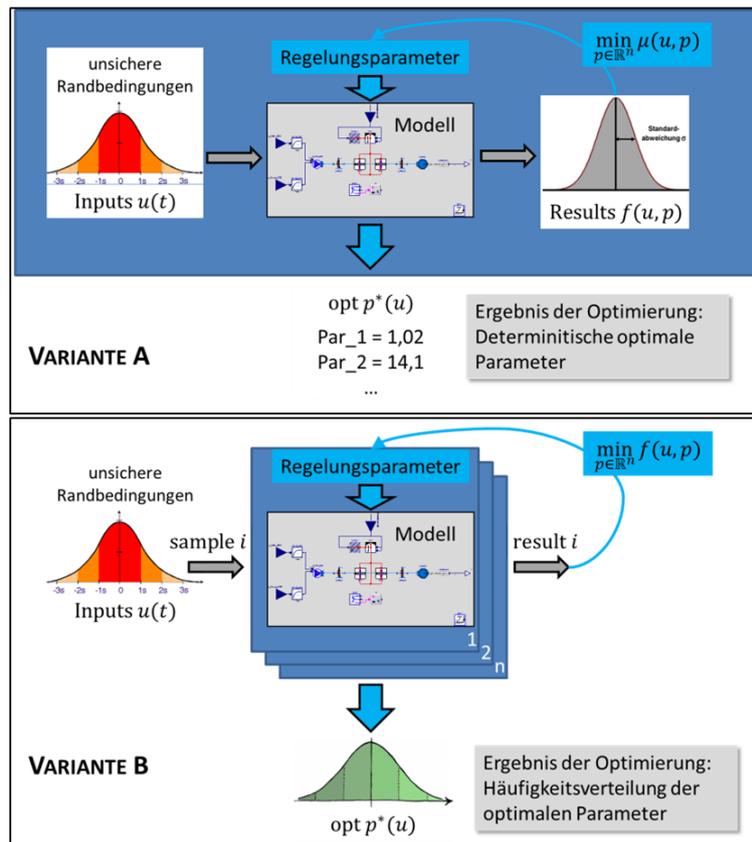


Abbildung 3.40: Schematische Darstellung zweier Varianten zur Optimierung unter Unsicherheit. Variante A (oben): Minimierung des Erwartungswertes der Zielfunktion. Variante B (unten): Monte-Carlo Optimierung

dass in jeder Iteration des Optimierungsalgorithmus der Erwartungswert der resultierenden Zielgröße für die Minimierung betrachtet wird. Das bedeutet, dass in jeder Iteration Monte Carlo Simulationen auf Basis bestimmter Input-Samples der Randbedingungen durchgeführt werden.

**Variante B:** In dieser Variante werden aus den möglichen unsicheren Randbedingungen eine Anzahl  $n$  an Samples generiert, für welche jeweils unabhängige Optimierungen durchgeführt werden. Als Ergebnis erhält man eine Häufigkeitsverteilung der optimalen Regelungsparameter. Die Varianz der Verteilung spiegelt die Sensitivität des Parameters gegenüber schwankenden Randbedingungen wider, d.h. ob der Wert gleich, ähnlich oder stark unterschiedlich gewählt wird, wenn die Randbedingungen sich ändern.

Die Untersuchungen zeigten, dass für den betrachteten Anwendungsfall keine signifikanten Abweichungen der identifizierten optimalen Regelungsparameter zwischen der Variante A und einer Optimierung ohne Berücksichtigung der Unsicherheit auftreten. Die genauere Untersuchung der Häufigkeitsverteilungen der optimalen Parameter mittels Variante B zeigte, dass die Wahl der Regelungsparameter robust gegenüber veränderten Randbedingungen ist. Es sind nur geringe Varianzen der Parameter zu erkennen (siehe Abbildung 3.41).

In Abbildung 3.42 sind die Zusammenhänge zwischen den optimalen Regelungsparametern und den variierten Randbedingungen für die internen und solaren Gewinne dargestellt.

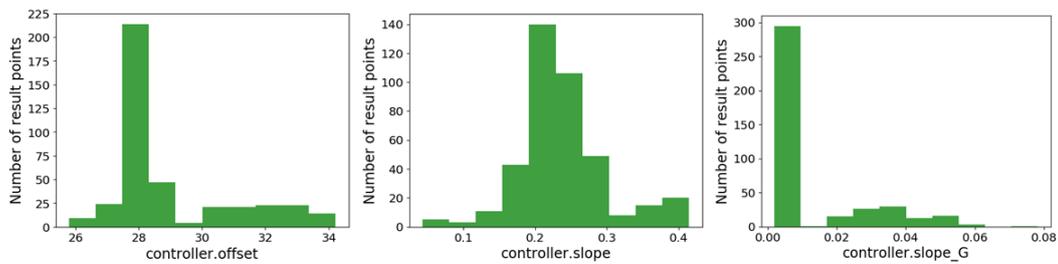


Abbildung 3.41: Häufigkeitsverteilung der optimalen Regelungsparameter, welche über die Optimierung unter unsicheren Randbedingungen (Variante B) identifiziert wurden

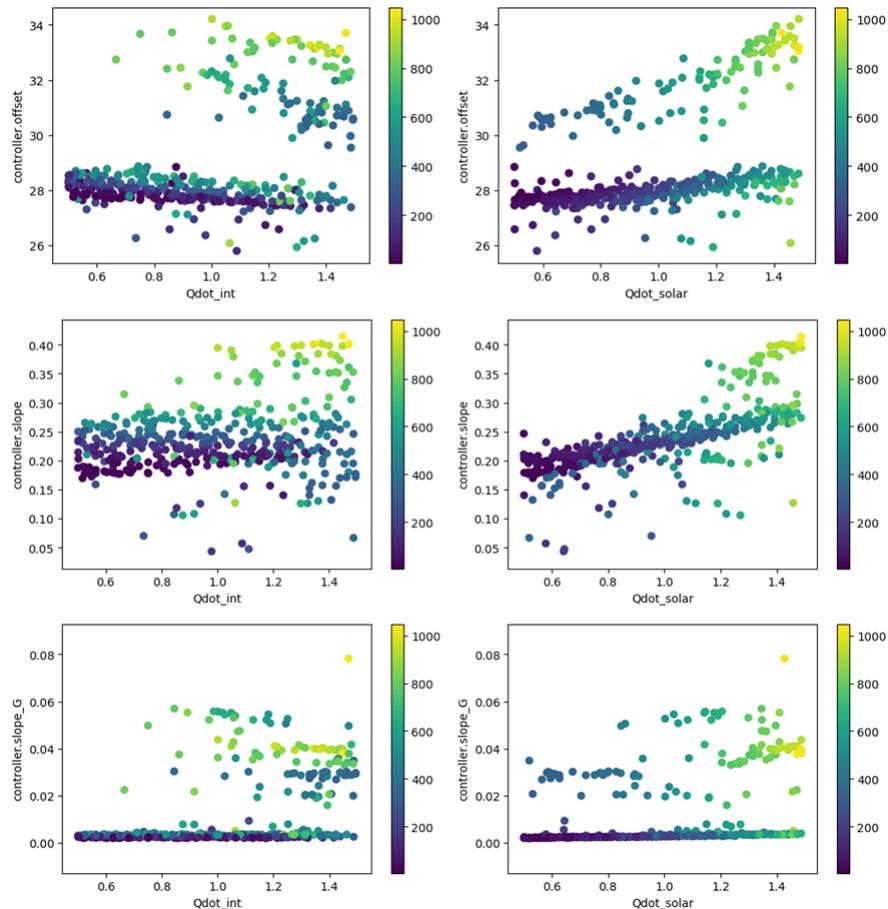


Abbildung 3.42: Optimale Regelungsparameter ( $\text{offset} = \vartheta_{\text{offset}}$ ,  $\text{slope} = m_{\vartheta_{\text{amb}}}$ ,  $\text{slope}_G = m_{G_{\text{sol}}}$ ) in Abhängigkeit der Schwankungen der internen und solaren Lasten ( $x$ -Achse: Faktor für die Unsicherheit der vorhergesagten Lasten; 1.0 bedeutet wie vorhergesagt; 0.8 bedeutet 20% geringe Lasten; 1.2 bedeutet 20% höhere Lasten). Farbskalierung abhängig der kumulierten Komfortabweichungen in Kelvin-Stunden.

Es sind deutliche Zusammenhänge zwischen den Regelungsparametern und den Randbedingungen zu erkennen. In den Punktwolken befinden sich einige Ausreißer, bei denen die Optimierungen nicht bzw. in einem lokalen Minimum konvergierten (z.B. in den oberen Diagramm bei Temperaturen über  $30^\circ\text{C}$ ). Der offset hat eine vergleichsweise geringe Varianz zwischen  $27.5$  und  $28.5^\circ\text{C}$  und damit nur eine geringe Abhängigkeit von den internen und solaren Lasten. Der Parameter slope hängt stärker von den internen und solaren Lasten mit einem Bereich zwischen  $0.18\text{ K/K}$  bei nur 50% der Nominallasten und  $0.28\text{ K/K}$  bei 150% der Nominallasten ab. In den beiden oberen

rechten Diagrammen ist zu erkennen, dass bei höheren solaren Lasten durch den Optimierer ein höherer offset und höhere Steigungen  $slope$  und  $slope_G$  gewählt werden, wodurch sich eine insgesamt steilere Heizkurve und eine höhere Varianz der Vorlauf-temperaturen während des gesamten Betriebszeitraums ergibt.

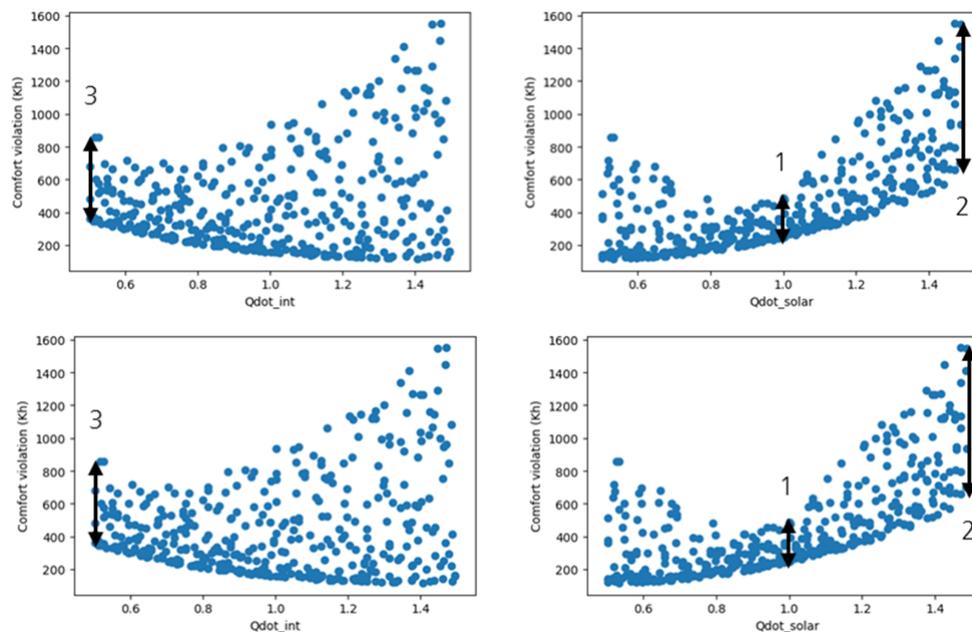


Abbildung 3.43: Komfortabweichungen in Abhängigkeit der Schwankungen der internen und solaren Lasten ( $x$ -Achse: Faktor für die Unsicherheit der vorhergesagten Lasten; 1.0 bedeutet wie vorhergesagt; 0.8 bedeutet 20% geringe Lasten; 1.2 bedeutet 20% höhere Lasten).

Es ergeben sich unterschiedliche Varianzbereiche für die Komfortabweichungen in Abhängigkeit der geänderten Randbedingungen (siehe nummerierte Beispiele in Abbildung 3.43):

- Beispiel 1: Falls die solaren Lasten ungefähr so hoch sind wie in den modellbasierten Optimierungen berücksichtigt wurde, sind Komfortabweichungen zwischen 210 und 430  $Kh$  zu erwarten.
- Beispiel 2: Falls die solaren Lasten 50% höher sind wie in den modellbasierten Optimierungen berücksichtigt wurde, sind Komfortabweichungen zwischen 620 und 1570  $Kh$  zu erwarten. Aufgrund der signifikant höheren solaren Lasten treten deutlich mehr Überschreitungen der oberen Komfortraumtemperatur von  $24^{\circ}C$  auf.
- Beispiel 3: Falls die internen Lasten 50% geringer sind als prognostiziert wurde, sind Komfortabweichungen zwischen 340 und 830  $Kh$  zu erwarten.

In Abbildung 3.44 ist die Wahrscheinlichkeitsverteilung des thermischen Komforts (Kelvin-Stunden) bei Verwendung der identifizierten optimalen Regelungsparameter und einer Varianz der tatsächlichen Randbedingungen zwischen 50 und 100

Es ist zu erkennen, dass beispielsweise die Wahrscheinlichkeit, dass Komfortabweichungen unter 500  $Kh$  auftreten, bei ca. 67% liegt (27.5% + 24% + 15%).

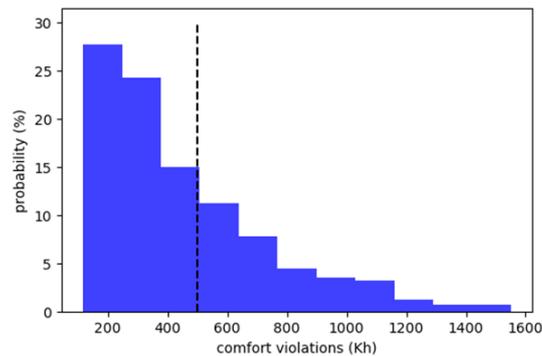


Abbildung 3.44: Wahrscheinlichkeitsverteilung des erreichten Komforts (Kelvin-Stunden) mit den verwendeten Regelungsparametern

**Berücksichtigung von Unsicherheiten in Wetterprognosedaten:** Die präsentierte Methodik eignet sich zur Quantifizierung der Unsicherheit bezüglich der Zielgröße aufgrund von unsicheren bzw. schwankenden Randbedingungen, welche sich durch Nutzereinfluss bzw. fehlerhafte Wetterprognosen ergeben. Für den betrachteten Anwendungsfall (mit TABS versorgter Raum) wurde gezeigt, dass die Regelung vergleichsweise robust gegenüber unsicheren Randbedingungen ist. Die Zusammenhänge zwischen den optimalen Regelungsparametern und schwankenden bzw. unsicheren Randbedingungen konnte dargestellt werden. Die zu erwartende Varianz der Zielgröße (Kelvin-Stunden Komfortabweichungen von einem definierten Komfortband) in Abhängigkeit der fehlerhaften Prognose der Randbedingungen konnte quantifiziert werden. Es wurde gezeigt, dass v.a. die solaren Gewinne eine hohe Sensitivität auf den zu erwartenden Komfort haben. Diese werden signifikant durch den Nutzer z.B. durch die Steuerung des Sonnenschutzes beeinflusst.

## 3.4 Modellierung von Fehlern in TGA-Anlagen

### 3.4.1 Hintergrund

Bereits die Existenz von MODELICA<sup>®</sup> Bibliotheken, wie der FAULTTRIGGERINGLIBRARY [22], die dem Ziel dienen, Fehler in dynamischen Systemen zu simulieren, zeigt den Stellenwert der Fehlersimulation. Der Simulation von Fehlern hat insbesondere in sicherheitsrelevanten Bereichen, wie der Luft- und Raumfahrt sowie der Kraftwerks- und Prozesstechnik eine hohe Relevanz. Da gebäudetechnische Systeme zunehmend komplexer werden, besteht jedoch auch in diesem Bereich ein Bedarf an Modellen, die nicht nur den nominalen Betrieb beschreiben, sondern auch aufzeigen, wie sich Systeme unter der Einwirkung von Fehlern verhalten [30]. Auf der einen Seite tragen solche Modelle zum Verständnis des Anlagenverhaltens bei und auf der anderen Seite ermöglichen sie es, ein einheitliches Testumfeld zum Vergleich verschiedener Methoden zur Fehlererkennung und Diagnose zu schaffen.

### 3.4.2 Werkzeuge

Für die Erzeugung von fehlerbehafteten Modellen wurde die MODELICA<sup>®</sup> FAULTTRIGGERINGLIBRARY [22] verwendet. Die Bibliothek ermöglicht eine Einteilung der Fehler in zwei Klassen mit konstanten Fehlern, welche vor Beginn der Simulation festgelegt werden und variablen Fehlern, welche während der Simulation veränderliche Werte annehmen können. Für diese beiden Klassen können Fehler der Datentypen Bool, Real und Integer erzeugt werden. Werden die standardisierten Fehler dieser Klassen in ein Modell implementiert, kann anschließend über die Funktion `createFaultPackage` eine Bibliothek erzeugt werden, welche eine Erweiterung des ursprünglichen Modells enthält. Diese Erweiterung enthält einen zentralen Block, mit welchem die Fehler konfiguriert und verwaltet werden können.

### 3.4.3 Methodik

In einem ersten Schritt wurden die Fehler modelliert und anschließend simuliert. Dabei wurde zuerst eine vierwöchige Phase ohne Fehler zum Training der FED-Algorithmen generiert. Anschließend wurde ein Fehler für einen Zeitraum von zwei Tagen programmiert, woraufhin fünf fehlerfreie Tage folgen. Dieses Intervall wird zwei Mal wiederholt. So können die FED-Methoden den selben Fehler beim ersten Mal erlernen und danach selbständig erkennen.

### 3.4.4 Fehlermodellierung in Komponenten

Mischventil: Zur Abbildung von Dreiwege-Mischventilen wurde das Modell `ThreeWayLinear` der MODELICA<sup>®</sup> Buildings Library verwendet. Es modelliert den Fluidstrom zwischen drei Anschlüssen. Die Anschlüsse `port_1` und `port_3` sind als Fluideingänge, Anschluss `port_2` als Fluidausgang definiert. Die Fluidanschlüsse werden durch ein zentrales Fluidvolumen vom Typ `Buildings.Fluid.Delays.DelayFirstOrder` miteinander verknüpft. Dieses Modell bildet mithilfe einer Differentialgleichung erster Ordnung eine Verzögerung des Fluidtransports ab. Die Größe des Volumens wird dabei so

gewählt, dass bei nominalem Massenstrom eine Verzögerung tritt, welche als Parameter definiert werden kann. Zwischen den Anschlüssen `port_1` und `port_2` und dem Volumen befindet sich jeweils ein lineares Drosselventil vom Typ `Buildings.Fluid.Actuators.Valves.TwoWayLinear`. Diese Drosselventile beeinflussen Druckverlust und Fluidströme. Sie werden angesteuert über ein Stellsignal  $y$ , welches den Wert 1 annimmt, wenn das Fluid ausschließlich von `port_1` nach `port_2` strömt und den Wert 0, wenn ein Durchfluss lediglich von `port_3` nach `port_2` stattfindet. Der dritte Arm des Ventils, zwischen Volumen und Anschluss `port_2`, ist nicht reibungsbehaftet.

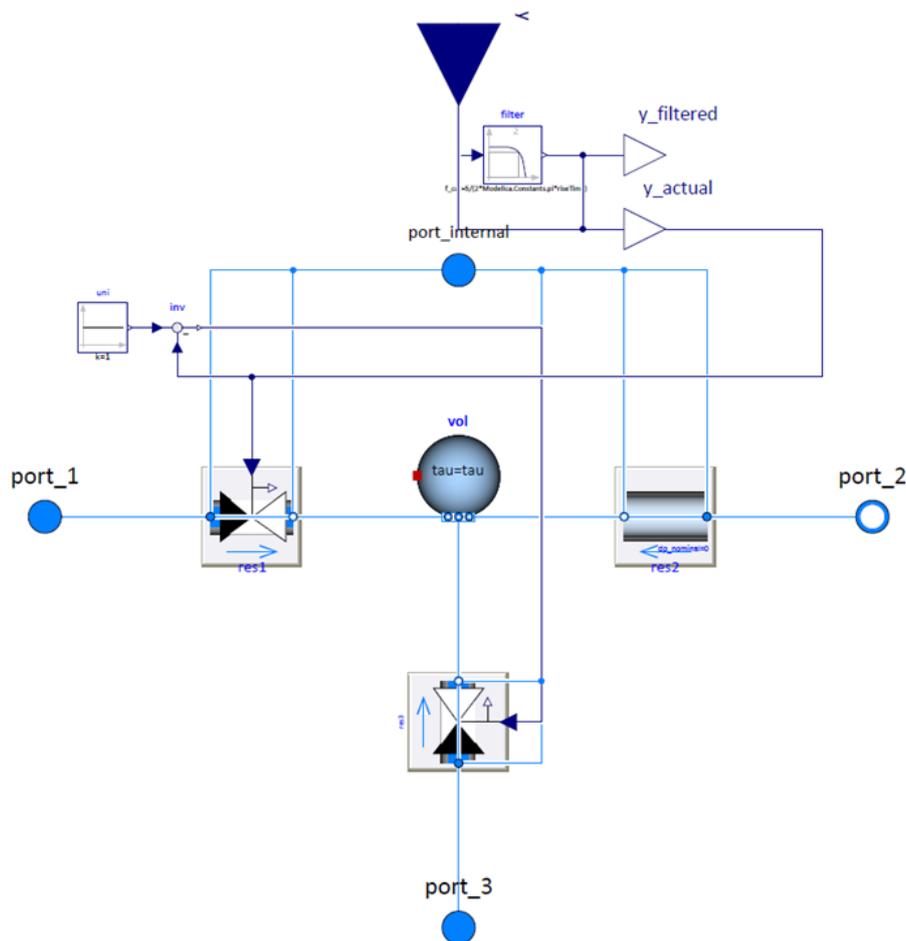


Abbildung 3.45: Modell des linearen Dreiwege-Ventils

Der sich einstellende Massenstrom und der Druckverlust für den Fluidstrom von `port_1` nach `port_2` berechnen sich mithilfe der Eingangsparameter  $\dot{m}_n$  und  $\Delta p_n$  adäquat zu den Druckverlusten der Rohre. Der sich einstellende Massenstrom und Druckverlust für den Fluidstrom von `port_3` nach `port_2` berechnen sich über den Eingangsparameter  $fra_K$ . Dieser wird, wie in Gleichung (3.17) beschrieben, definiert.

$$fra_K = \sqrt{\frac{\Delta(\text{port}_2 \text{ zu } \text{port}_3)}{\Delta(\text{port}_1 \text{ zu } \text{port}_2)}} \quad (3.17)$$

Für die Modellierung klemmender Ventile wurde das Modell des Mischventils um einen Baustein erweitert. Dieser verwendet das Eingangssignal  $u$ , durch welches die Ventilstellung zur Mischung der Fluidströme von außen definiert werden kann. Dieses Eingangssignal wird vor der Weitergabe an den Tiefpass-Filter modifiziert. Dazu werden

die Bausteine `VariableRealFault` und `VariableBooleanFault` verwendet. Die boolesche Variable dient der Freigabe des Fehlers. Die reelle Variable gibt die Ventilstellung während der Freigabe an. Somit erhält das fehlerbehaftete Mischventil als Eingangssignal eine Ventilstellung, gibt diese jedoch nicht weiter. Stattdessen wird die Ventilstellung des `VariableRealFault` verwendet. Die vom Ventil-Modell ausgegebenen Werte für die Ventilstellung `y_filtered` und `y_actual` zeigen den tatsächlich auftretenden Zustand mit Fehler an.

**Temperatursensor:** Ziel der Fehlermodellierung an Sensoren zur Messung von Temperaturen an Fluidströmen war eine fehlerhafte Ausgabe von Messwerte. Der Aufbau der beiden verwendeten Modelle zur Messung von Fluidtemperaturen, welche unter `Buildings.Fluid.Sensors.Temperature` und `Buildings.Fluid.Sensors.TemperatureTwoPort` in der Buildings Library zu finden sind, lässt keine Abänderung der Temperatur durch reelle Werte zu. Es können lediglich natürliche Zahlen addiert oder subtrahiert werden. Dies geschieht durch den `InternalIntegerFault` der Fault Triggering Library. Die Implementierung erfolgt so, dass der Temperatursensor eine Abweichung vom Soll-Wert ausgibt. Die reale Fluidtemperatur wird jedoch nicht geändert, es erfolgt also keine Zu- oder Abfuhr von Wärme.

**Pumpe:** Die Abbildung von ausfallenden oder in ihrer Leistung reduzierten Pumpen erfolgt nicht durch eine Abänderung der bestehenden Modelle. Stattdessen wird das Eingangssignal für die Druckdifferenz bei  $\Delta p$ -geregelten Pumpen bzw. des Massenstroms bei Massenstrom geregelten Pumpen manipuliert. Dazu wird dem Eingangssignal ein simples Modell zwischengeschaltet, welches den Stellwert mit einer reellen Variable multipliziert. Diese wird durch einen Baustein `VariableRealFault` der Fault Triggering Library definiert und nimmt im nicht aktivierten Zustand den Wert 1 an. Bei Aktivierung wird der Wert über ein Zeitintervall hinweg auf seinen Zielwert abgesenkt.

**Wärmeerzeuger [28]:** An den Wärmeerzeugern werden mehrere fehlerhafte Betriebszustände abgebildet. Zum einen wird der Ausfall des Wärmeerzeugers, zum anderen die Bereitstellung einer vom vorgegebenen Wert abweichenden Rücklauftemperatur, simuliert. Zusätzlich dazu kann auch ein fehlerhafter Temperatursensor zur Regelung der Rücklauftemperatur modelliert werden. Der Ausfall bzw. die Reduktion der Wärmeleistung des Erzeugers wird simpel über die Multiplikation der vorgesehenen Leistung mit einem `VariableRealFault` realisiert (siehe Abbildung 3.46).

Der Wert des Fehlerbausteins nimmt im nicht aktivierten Zustand den Wert 1 an. Bei Aktivierung wird der Wert über ein Zeitintervall hinweg auf seinen Zielwert abgesenkt. Eine fehlerhafte Vorlauftemperatur wird anhand eines Bausteins erzeugt, bei welchem die Solltemperatur, welche als Input in den Wärmeerzeuger eingeht, mit einem `VariableRealFault` addiert wird. Dieser besitzt im nicht aktiven Zustand den Wert 0.

### 3.4.5 Fehlermodellierung in Systemen

*Sowohl der Text als auch die Abbildungen dieses Abschnitts 3.4.5 wurden der Masterarbeit von Jakob Merck [28] entnommen.*

**3.4.5.1 Hochtemperaturwärme-Kreislauf** Das Nominalmodell des HT-Kreises wurde so abgeändert, dass es fünf Fehler in Komponenten der Anlage abbildet. Diese

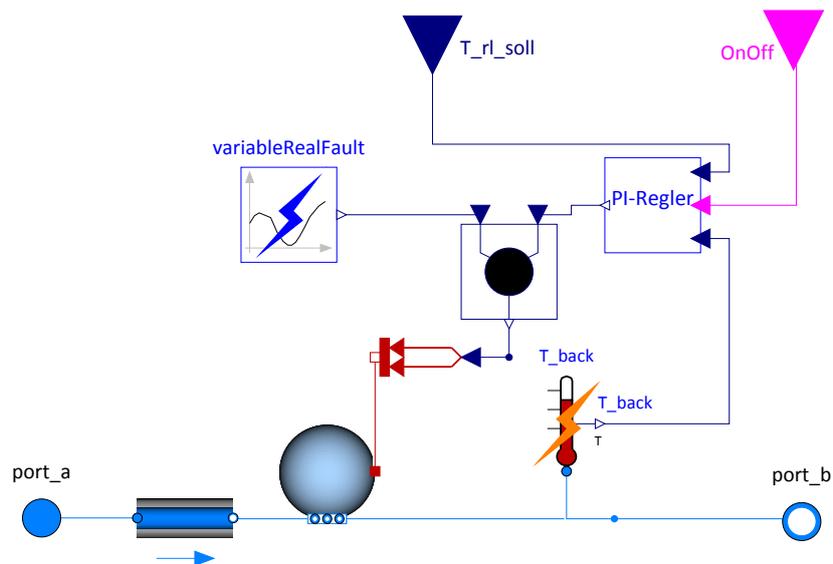


Abbildung 3.46: Visualisierung des fehlerbehafteten Wärmeerzeugermodells [28]

nicht ordnungsgemäßen Betriebszustände wurden ebenfalls einzeln simuliert. Abbildung 3.47 zeigt die fehlerhaften Komponenten und die numerische Zuordnung des erzeugten Fehlers. Tabelle 3.8 gibt eine einfache Beschreibung der Fehler wieder.

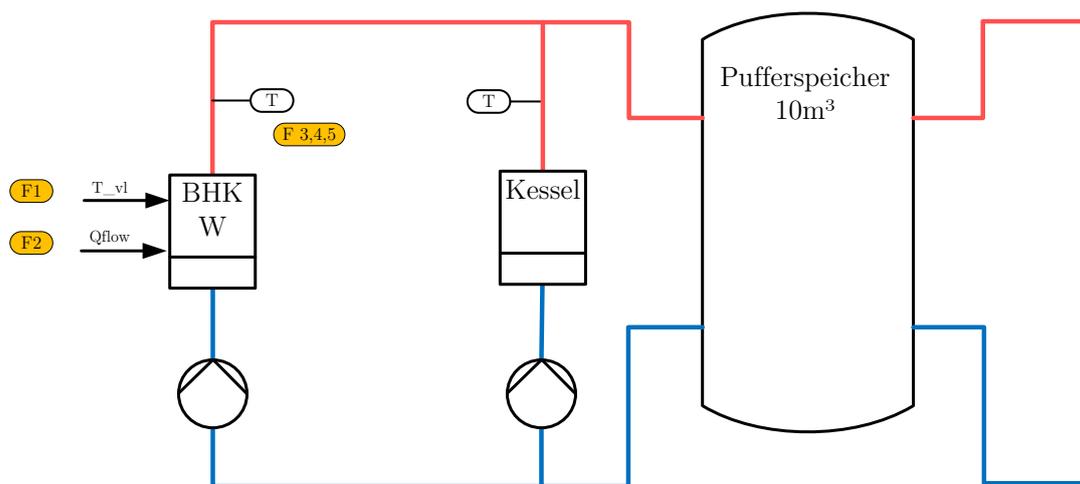


Abbildung 3.47: Fehlerimplementierung in Komponenten des Hochtemperatur-Kreislauf [28]

**3.4.5.2 Niedertemperaturwärme-Kreislauf** Das Nominal-Modell für die Niedertemperatur-Wärmeversorgung wurde so abgeändert, dass es acht Fehler in Komponenten der Anlage abbildet. Diese nicht ordnungsgemäßen Betriebszustände werden nicht parallel auftretend und sich dabei überlagernd, sondern einzeln simuliert. Abbildung 3.48 zeigt die fehlerhaften Komponenten und die numerische Zuordnung des erzeugten Fehlers. Tabelle 3.9 gibt eine einfache Beschreibung der Fehler wieder.

Tabelle 3.8: Fehler im Hochtemperaturwärme-Kreislauf [28]

Fehler- nummer	Bauteil	Beschreibung
F1	Sollwertgeber BHKW	Speicherbeladung durch BHKW mit fehlerhafter $T_{VI,BHKW} = 20\text{ °C}$
F2	BHKW	Speicherbeladung durch BHKW mit $\dot{Q}_{BHKW} = 0$
F3	Temperatursensor BHKW VI	Sensor $T_{VI,BHKW}$ addiert Messfehler von 10 K
F4	Temperatursensor BHKW VI	Sensor $T_{VI,BHKW}$ addiert Messfehler von 20 K
F5	Temperatursensor BHKW VI	Sensor $T_{VI,BHKW}$ addiert Messfehler von 40 K

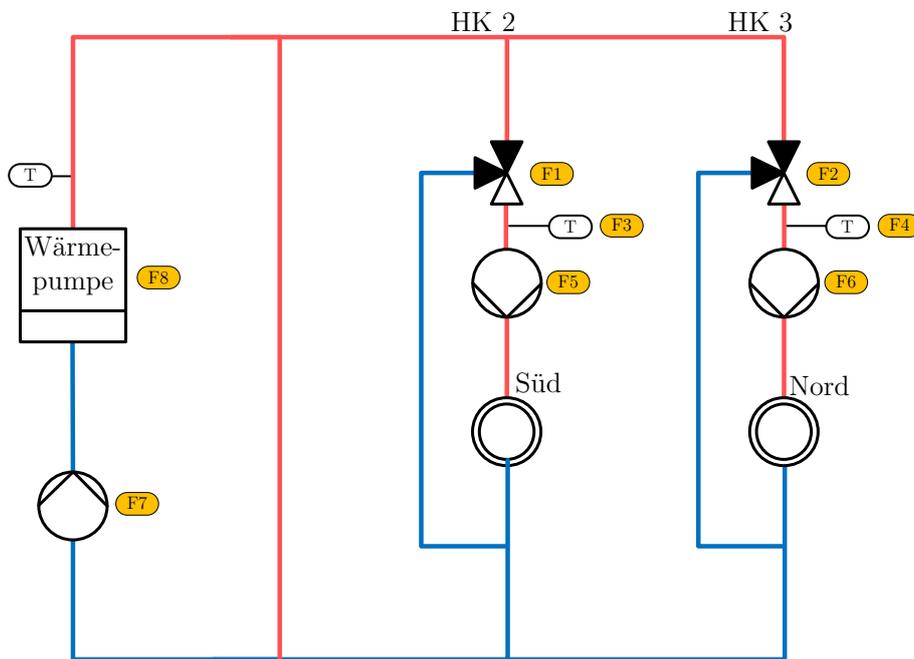


Abbildung 3.48: Fehlerimplementierung in Komponenten des Niedertemperatur-Kreislauf [28]

Tabelle 3.9: Fehler im Niedertemperatur-Kreislauf [28]

Fehlernr.	Bauteil	Beschreibung
F1	Mischventil HK 2	Ventil klemmt in Position 90 %
F2	Mischventil HK 3	Ventil klemmt in Position 5 %
F3	Temperatursensor HK 2 VI	Sensor addiert Messfehler von 4 K
F4	Temperatursensor HK 2 VI	Sensor subtrahiert Messfehler von $-4\text{ K}$
F5	Pumpe 16 (HK 2)	Druckdifferenz sinkt um 50 %
F6	Pumpe 17 (HK 3)	Druckdifferenz sinkt um 90 %
F7	Pumpe 22 (Erzeuger-Kreislauf)	Massenstrom sinkt um 80 %
F8	Wärmepumpe	Ausfall Wärme-/Kälteerzeuger

### 3.4.6 Ergebnisse

Dieses Kapitel stellt die Ergebnisse der Simulation von Fehlern in gebäudetechnischen Systemen der KPBM dar. Dabei werden die Auswirkungen der in Abschnitt 3.4.5 beschriebenen Fehler diskutiert. Alle Abbildungen zur Veranschaulichung der Auswirkungen der Fehler folgen derselben Systematik. Die obere Teilgrafik zeigt die Implementierung des Fehlers. Im mittleren Teil werden direkte Reaktionen des Systems aufgezeigt. In der unteren Teilgrafik sind Auswirkungen für die Nutzer aufgetragen. Rote Linien markieren den fehlerbehafteten Verlauf eines Signals, blaue Linien den alternativen, nominalen Verlauf.

**3.4.6.1 Hochtemperaturwärme-Kreislauf:** In diesem Unterkapitel werden die Ergebnisse der im Hochtemperaturkreis implementierten Fehler analysiert.

**Fehler 1, fehlerhafte Sollwert-Temperatur für den BHKW-Vorlauf:** Abbildung 3.49 zeigt Ursache und Auswirkungen von Fehler 1, der eine fehlerhafte Sollwert-Temperatur für den BHKW-Vorlauf von  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  simuliert.

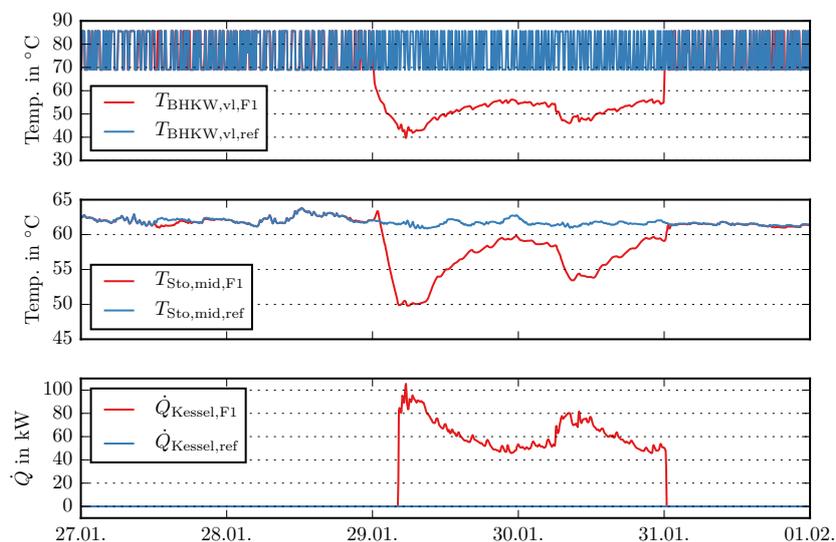


Abbildung 3.49: Auswirkungen der Implementierung von Fehler 1 auf das HT-Heizsystem [28]

In der oberen Teilgrafik ist die reale Vorlauf-Temperatur des BHKW für den Referenzfall ( $T_{BHKW,vl,ref}$ ) sowie für Fehler 1 ( $T_{BHKW,vl,F1}$ ) aufgetragen. Im regulären Betrieb oszilliert  $T_{BHKW,vl}$  wegen der Zweipunktregelung in einem Bereich von  $68\text{ }^{\circ}\text{C}$  bis  $86\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Tritt der Fehler auf, wird dem System keine Wärme mehr zugeführt, da die Rücklauf-Temperatur höher als die fehlerhafte Sollwert-Temperatur von  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  ist. Die Umwälzpumpe des BHKW-Kreises arbeitet jedoch weiter, wodurch es zu einer Durchmischung des Pufferspeichers kommt. Sinkt die Temperatur in der Mitte des Speichers  $T_{Sto,mid}$  (siehe mittlerer Teil der Abbildung 3.49) unter den Grenzwert von  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ , wird der Gaskessel zugeschaltet (Abbildung 3.49 unten). Dieser erzeugt einen Wärmestrom an den Speicher von  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$  bis  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Die Beladung des Speichers mit heißem Kesselwasser wird folglich durch das BHKW gestört, da dieses den Speicher durchmischt. Dabei ist der Einfluss des BHKW aufgrund des höheren Massenstroms groß. Der Kessel wird erst abgeschaltet, wenn  $T_{Sto,mid} > 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ , was erst nach Ende des Fehlers eintritt.

Da zwei Wärmequellen vorhanden sind, kann der fehlerhafte Betrieb des BHKW der durch Fehler 1 modelliert wird, durch den Kessel ausgeglichen werden. Somit wird der Bedarf der Wärmesenken meist hinlänglich gedeckt. Fehler 1 im HT-System zeigt einen fehlerhaften Sollwert für den BHKW-Vorlauf. Da hier keine Abweichung zwischen Soll- und Istwert vorhanden ist, kann diese nicht für FED genutzt werden. Da der Fehler für eine Durchströmung des Speichers ohne Zufuhr von Wärme sorgt, wird die Temperaturschichtung im Speicher gestört. Die veränderten Werte der Temperaturfühler, welche oben, unten und in der Mitte des Speichers angebracht sind, könnten als Größen für die Fehlererkennung genutzt werden.

**Fehler 2, ausfallender Wärmeerzeuger im BHKW-Kreis:** Bei Fehler 2 arbeitet die Pumpe des BHKW (P6) weiter, wodurch es zu den selben Reaktionen des Systems wie bei Fehler 1 des HT-Systems kommt: Der Kessel wird eingeschaltet und P6 sorgt für eine Durchmischung des Speichers.

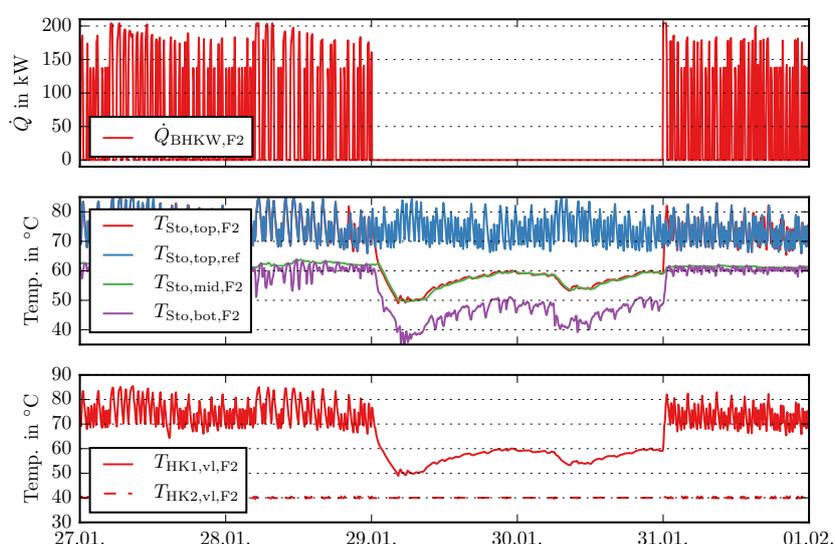


Abbildung 3.50: Auswirkungen der Implementierung von Fehler 2 auf das HT-Heizsystem [28]

Abbildung 3.50 zeigt im oberen Teil den Ausfall des Wärmeerzeugers. Im mittleren Teil wird die obere Speichertemperatur  $T_{Sto,top}$  für den Referenzfall sowie für Fehler 2 aufgetragen. Diese sinkt während des Fehlers stark ab. Die Speichertemperaturen in der Mitte und unten zeigen, dass es durch den Fehler zu einer vollständigen Durchmischung von oberem und mittlerem Speicherteil mit Temperaturen von  $50^{\circ}\text{C}$  bis  $60^{\circ}\text{C}$  kommt. Zwischen mittlerem und unterem Temperatursensor kann eine Schichtung von etwa  $10\text{ K}$  identifiziert werden. Diese bleibt bestehen, da der Entnahmestutzen von BHKW und Kessel oberhalb des unteren Temperatursensors liegt. Der untere Sensor liegt auf Höhe des Rücklaufstutzens der Wärmesenken, weshalb die gemessene Temperatur an dieser Stelle des Speichers der Temperatur des HT-Heizkreisverteilers entspricht. Im unteren Teil von Abbildung 3.50 werden die Vorlauftemperaturen der HT-Heizkreise 1 und 2 aufgetragen. Es wird deutlich, dass HK2 nicht durch den Fehler tangiert wird, da der Sollwert von  $T_{HK2,vl}$  unter der vom Heizkreisverteiler gelieferten Temperatur liegt. Für die Brauchwarmwasserbereitung in HK1 treten jedoch Probleme auf, da hier ein deutlicher Einbruch bei der Vorlauftemperatur  $T_{HK1,vl,F2}$  erkennbar ist.

Da in Fehler 2 der Ausfall des Erhitzers simuliert wird, kann im Gegensatz zu Fehler 1

eine Abweichung zwischen Soll- und Istwert identifiziert werden. Damit ist dieser Fehler leicht zu erkennen.

**Fehler 4, Sensorfehler:** Abbildung 3.51 zeigt Ursache und Auswirkungen von Fehler 4 im Hochtemperaturkreis. Der Fehler tritt am Temperatursensor des Vorlaufs des BHKW zur Regelung der Vorlauftemperatur auf. Es wurde eine fehlerhafte Messung dieser Temperatur mit einem Offset von  $+20\text{ K}$  implementiert. In der oberen Teilgrafik sind die Sensortemperaturen des BHKW-Vorlaufs für den Referenzfall  $T_{BHKW,VI,ref}$  sowie für Fehler 4  $T_{BHKW,VI,F4}$  visualisiert. Im Fehlerzeitraum 29.01. 00:00 Uhr bis 31.01. 00:00 Uhr liegt der fehlerhafte Messwert  $T_{BHKW,VI,F4}$  durchschnittlich bei  $87^\circ\text{C}$ . In Realität wird folglich auf eine Fluidtemperatur von  $67^\circ\text{C}$  geregelt. Die Bedingung zum Abschalten des BHKW ( $T_{Sto,bot} > 60^\circ\text{C}$ ) wird im fehlerhaften Zustand nicht erreicht (siehe unterer Teil von Abbildung 7). Das BHKW taktet nicht mehr, sondern bleibt eingeschaltet, was die Glättung der Temperaturen  $T_{BHKW,VI,F4}$ ,  $T_{Sto,top,F4}$  und  $T_{Sto,mid,F4}$  erklärt. Die in der mittleren Teilgrafik gezeigte Wärmeleistung des BHKW wird durch die geringere Temperaturspreizung reduziert. Die benötigte Wärmemenge kann jedoch durch den Dauerbetrieb aufrechterhalten werden. Für die Verbraucher entsteht keine starke Beeinflussung, bei HK1 sinkt jedoch der Wärmestrom an die Senke durch die verringerte Vorlauftemperatur.

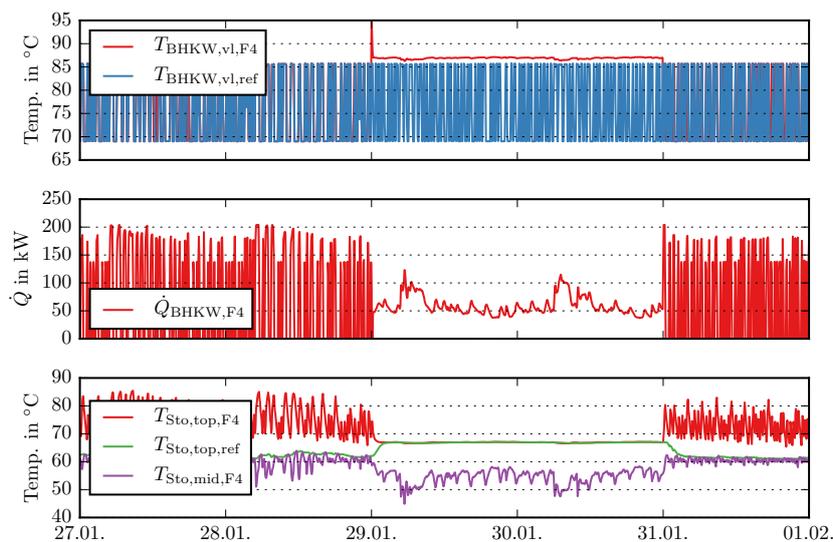


Abbildung 3.51: Auswirkungen der Implementierung von Fehler 4 auf das HT-Heizsystem [28]

Für Fehler 4 ist die Erkennung einer Abweichung zwischen Soll- und Istwert nicht möglich, da eine fehlerhafte Messung der Vorlauftemperatur abgebildet wird. Eine Änderung im Betrieb lässt sich rein optisch aus Abbildung 3.51 ableiten, da das BHKW nicht weiter taktet und die Temperaturverläufe dadurch geglättet werden. Ob die FED-Methoden diese Anomalie erkennen, muss in weiterführenden Untersuchungen geklärt werden.

**3.4.6.2 Niedertemperaturwärme-Kreislauf** In das Niedertemperaturwärmesystem, bestehend aus der Wärmepumpe und den NT-Heizkreisen 2 und 3 zur Versorgung der TABS, wurden acht Fehler implementiert.

**Fehler 1 und Fehler 2, Klemmende Dreiwegeventile:** Fehler 1 und 2 im NT-Modell bilden klemmende Ventile in einer vordefinierten Position ab. Die Implementierung wurde so vorgenommen, dass zum definierten Zeitpunkt innerhalb von 100 s die definierte Ventilstellung angenommen wird. Anschließend bleibt das Ventil in dieser Position stecken. Fehler 1 bildet ein klemmendes Dreiwegeventil zur Rücklaufbeimischung im HK2 in der Position 95 % ab. In der oberen Teilgrafik von Abbildung 3.52 wird die reale Stellung  $y_{mxv, HK2}$  ist des Mischventils rot und die von der Regelung vorgegebene Sollstellung  $y_{mxv, HK2, soll}$  soll blau dargestellt. Wird der Fehler ausgelöst, nimmt die reale Ventilstellung einen Wert von 95 % ein. Da somit eine zu geringe Beimischung durch den Rücklauf erfolgt, steigt die Temperatur des Vorlaufs für HK2  $T_{HK2, vl, F1}$  über den Sollwert an (siehe mittleren Teil von Abbildung 3.52). Die Regelung für das Mischventil gibt deshalb eine Sollventilstellung  $y_{mxv, HK2, soll} = 0\%$  vor. Bedingt durch die Trägheit der TABS erfolgt ein sanfter Anstieg der fehlerhaften Raumlufttemperatur. Im unteren Teil der Abbildung wird exemplarisch die Raumlufttemperatur der dritten Zone  $T_{air, Z3}$  aufgetragen. Da bei einer Überschreitung des Grenzwerts  $T_{air, Z3} = 22\text{ }^\circ\text{C}$  die Ventile der TABS und SS geschlossen werden, kann dieser Fehler schnell durch das System kompensiert werden.

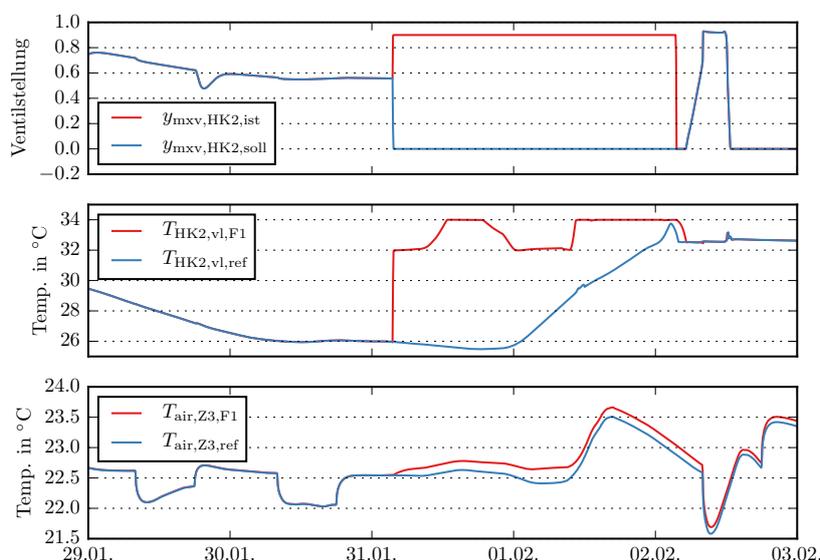


Abbildung 3.52: Auswirkungen der Implementierung von Fehler 1 auf das NT-Heizsystem [28]

Fehler 2 simuliert ein, in der Stellung 5 %, klemmendes Mischventil in HK3. Dabei verhält sich das System entsprechend Fehler 1, jedoch mit umgekehrten Richtungen. Wie in Abbildung 3.53 sichtbar wird, fordert die Regelung des Mischventils wegen zu niedriger Vorlauftemperatur in HK3 eine Öffnung des Mischventils mit  $y_{mxv, HK3, soll} = 100\%$ . Da das klemmende Ventil für eine fast ausschließliche Rücklaufbeimischung sorgt, sinkt die Vorlauftemperatur  $T_{HK3, vl, F2}$  bis auf  $21\text{ }^\circ\text{C}$  ab. Dadurch kommt es zu einer Auskühlung der Gebäudezonen 5, 6 und 7 (hier wird exemplarisch nur Zone 6 dargestellt) auf unter  $20\text{ }^\circ\text{C}$ .

Es gilt zu beachten, dass die simulierten Klemmpositionen nicht realitätsgetreuen Fehler abbilden. Für die Erkennung und Detektion diesen Fehlern ist das Erreichen der Klemmposition nachrangig, entscheidend ist das Verhalten des Systems während das Ventil klemmt. Untersuchungen zu der Problematik der klemmenden Ventile wurden

beispielsweise in [16] untersucht. Klemmende Dreiwegeventile zur Regelung der Vorlauftemperatur von Verbraucherkreisen durch Rücklaufbeimischung lassen sich nach ersten Einschätzungen zuverlässig erkennen, da sich eine Abweichung zwischen  $T_{Vl,soll}$  und  $T_{Vl,ist}$  zeigt. Die Änderung der Raumlufttemperatur hängt von weiteren Randbedingungen wie der Außentemperatur, die thermische Kapazität der Bauteile oder dem Nutzerverhalten ab. Bei Fehler 1 kommt es aufgrund der zu hohen Vorlauftemperatur zu einer leichten Erhöhung der Raumlufttemperatur um maximal  $0.3\text{ K}$  im Vergleich zum Referenzfall. Dabei treten keine Komfortverletzungen auf. Fehler 2 hingegen verursacht ein Absinken der Raumlufttemperatur unter  $20\text{ °C}$ , da die Vorlauftemperatur um  $6\text{ K}$  reduziert wird. Entscheidend für die Höhe der Komfortverletzung ist dabei auch die Zeitspanne, in welcher der Fehler auftritt. Für die implementierten Defekte wurde eine Fehlerdauer von  $48\text{ h}$  festgelegt. Bei einer größeren Zeitspanne für Fehler 2 würde die Raumlufttemperatur weiter absinken. Durch die hohe Speicherfähigkeit des Gebäudes kommt es ohnehin zu einer verzögerten Reaktion der Raumlufttemperatur auf Fehler. Da hier TABS als Heizflächen verwendet werden, reagiert das System deutlich langsamer als bei einer Verwendung von Radiatoren.

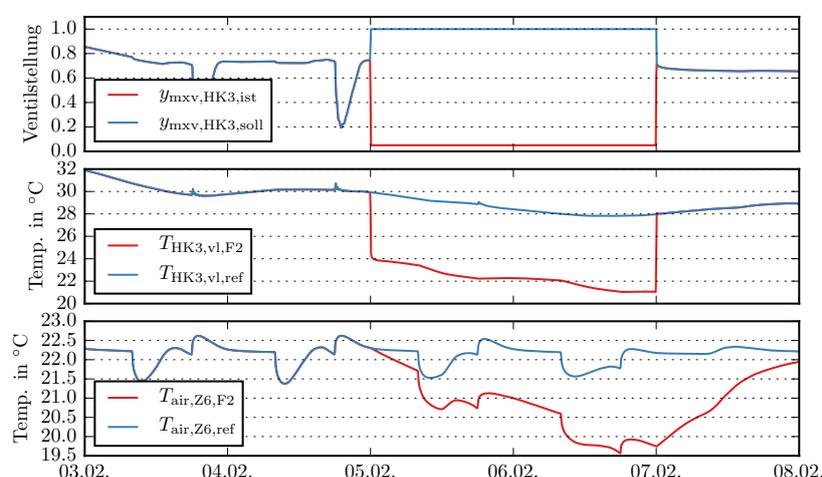


Abbildung 3.53: Auswirkungen der Implementierung von Fehler 2 auf das NT-Heizsystem [28]

**Fehler 3 und Fehler 4, Temperatursensorfehler:** Die Fehler 3 und 4 bilden eine fehlerhafte Messung oder Ausgabe der Fluidtemperatur ab. Ein solcher Fehler kann durch einen Sensordefekt, eine falsche Messwertübertragung in der GA oder durch eine unsorgfältige Anbringung von Tauchhülsefühlern zustande kommen.

In Abbildung 3.54 werden die Auswirkungen von Fehler 3 auf das System veranschaulicht. Der Fehler tritt am Temperatursensor des Vorlaufs von HK2, der zur Regelung der Rücklaufbeimischung dient, auf. Es wurde eine fehlerhafte Messung dieser Temperatur mit einem Offset von  $+4\text{ K}$  implementiert. In der oberen Teilgrafik wird die am Temperatursensor von HK2 gemessene Vorlauftemperatur für Fehler 3 sowie für einen Referenzfall aufgetragen. Wird der Fehler am 29.01. um  $00:00$  Uhr ausgelöst, steigt die fehlerhafte Vorlauftemperatur von HK2  $T_{HK2, vl, F3}$  kurzzeitig an. Durch eine vermeintliche Abweichung zwischen Soll- und Messwert von  $T_{[HK2, Vl]}$  wird mithilfe des Mischventils mehr Massenstrom des Rücklaufs beigemischt, wodurch die gemessene Vorlauftemperatur vermeintlich wieder auf den Sollwert geregelt werden kann. Die reale Vorlauftemperatur liegt nun jedoch  $4\text{ K}$  unter dem abgebildeten Wert. Dadurch sinkt

der Wärmedurchgangskoeffizient zwischen TABS bzw. SS und Raum. Es kommt zu einer Auskühlung der in Abbildung 3.54 unten gezeigten Raumlufttemperatur von Zone 3 ( $T_{air,Z3,F3}$ ), die erst 24 h nach Ende des Fehlers kompensiert wird.

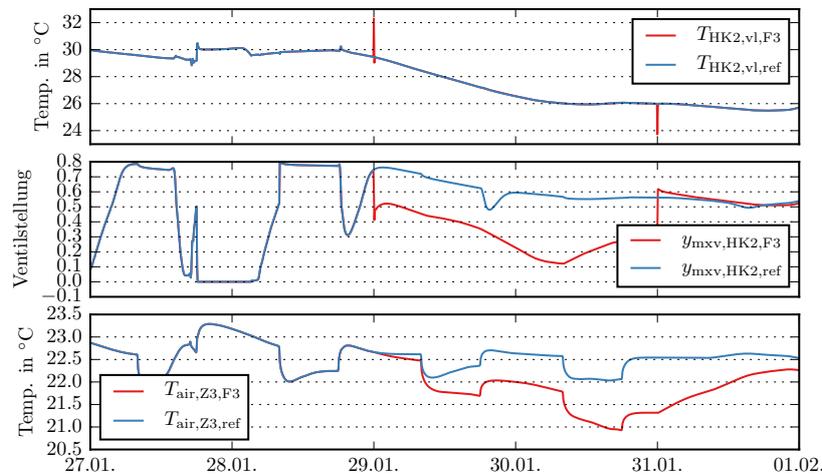


Abbildung 3.54: Auswirkungen der Implementierung von Fehler 3 auf das NT-Heizsystem [28]

Durch Fehler 4 wird eine fehlerhafte Messung der Vorlauftemperatur des Heizkreises 3  $T_{HK3,vl}$  mit einem Offset von  $-4 K$  simuliert. Abbildung 3.55 zeigt im oberen Teil am 29.01. sowie am 31.01. um 00 : 00 Uhr die Abweichung und schnelle Anpassung von  $T_{HK3,vl,F4}$  auf den Sollwert in Form von Ausreißern. Die reale Vorlauftemperatur liegt zwischen diesen beiden Zeitpunkten 4 K über der gemessenen und dargestellten Temperatur. Entsprechend sorgt das Mischventil für weniger Rücklaufbeimischung (siehe Abbildung 3.55 - Mitte). Im unteren Teil der Grafik kann eine leicht erhöhte Raumlufttemperatur abgelesen werden.

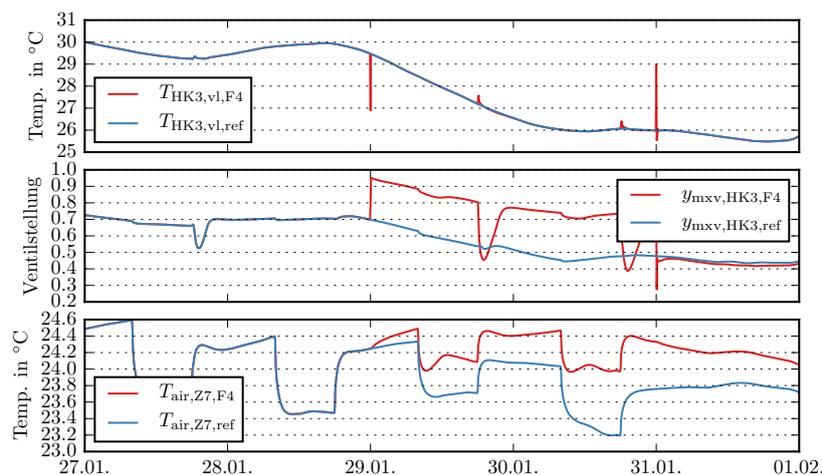


Abbildung 3.55: Auswirkungen der Implementierung von Fehler 4 auf das NT-Heizsystem [28]

Die Fehler 3 und 4 können weniger leicht identifiziert werden als Fehler 1 und 2, da keine Abweichung zwischen Soll- und Istwert auftritt. Erste Versuche, diesen Fehler mit der FED-Methode Entscheidungsbaum zu erkennen, scheiterten. Es lässt sich zwar

in den beschriebenen Fällen eine stufenartige Änderung der Ventilstellung feststellen, welche eine Reaktion auf die vermeintlich veränderte, gemessene Vorlauftemperatur ist. Die beiden unsachgemäßen Betriebszustände verursachen eine Abweichung der Raumlufttemperatur vom jeweiligen Referenzwert von  $-1\text{ K}$ , es werden jedoch keine Komfortverletzungen verursacht.

**Fehler 5 und Fehler 6, Reduktion der Pumpenleistung:** Abbildung 3.56 zeigt Fehler 5 und dessen Auswirkungen auf die Niedertemperaturversorgung. Die Reduktion der Pumpenleistung auf 50 % der Nennleistung von Pumpe 16 in HK2 führt zu einer Minderung der Druckerhöhung der Pumpe von 1.12 auf 0.56 bar. Daraus resultiert ein um 30 % verminderter Massenstrom  $\dot{m}_{HK2,F5}$  bei geöffneten Ventilen der TABS. Vom 29.01. 18:00 Uhr bis 30.01. 08:00 Uhr wird ein Teil der Ventile von TABS und SS der zu HK2 gehörenden Zonen 1, 2, 3 und 4 für den Referenzfall geschlossen, da die Grenzwerttemperatur von  $22^\circ\text{C}$  überschritten wird. Für Fehler 5 bleiben mehrere Ventile geöffnet, da durch die reduzierte Pumpenleistung die Zonen leicht auskühlen und nachts vermehrt beheizt werden. Somit kommt es nachts trotz reduzierter Pumpleistung zu höheren Massenströmen. Damit kann auch das Auskühlen der Gebäudezonen leicht kompensiert werden.

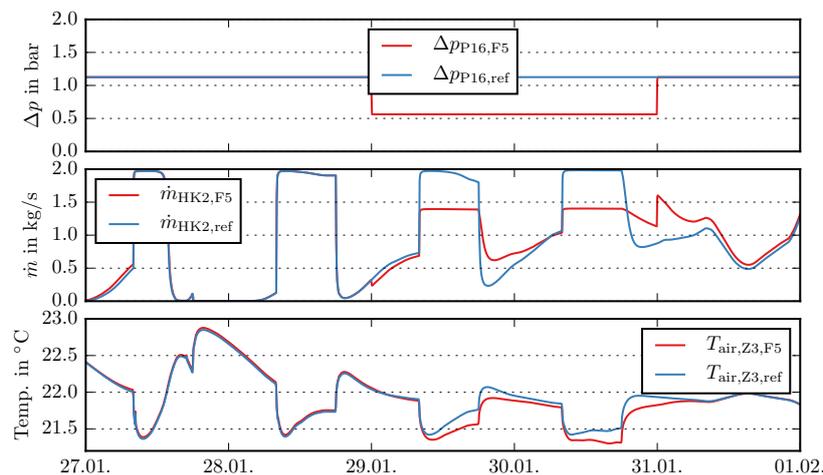


Abbildung 3.56: Auswirkungen der Implementierung von Fehler 5 auf das NT-Heizsystem [28]

Bei Fehler 6 wird die Leistung von Pumpe 17 um 80 % reduziert. Wie aus dem mittleren Teil der Abbildung 3.57 entnommen werden kann, sinkt der geförderte Massenstrom  $\dot{m}_{HK3,ref}$  damit auf  $0.5\text{ kg/s}$ . Er bleibt bei diesem Wert, da aufgrund zu niedriger Zonentemperaturen alle Ventile der TABS und SS komplett geöffnet werden und geöffnet bleiben. Fehler 6 führt zu einer deutlichen Auskühlung der Zonen, wobei  $T_{air,Z6,F6}$  selbst 24 h nach Ende des Fehlers den Sollwert nicht erreicht.

Bei Fehler 5 bzw. 6 kann gezeigt werden, dass das Gesamtsystem in der Lage ist, die vorliegenden Fehler durch entsprechende Reaktionen zumindest teilweise zu kompensieren. Eine Reduktion der Pumpenleistung führt zu verminderten Massenströmen an die Verbraucher. Die Raumlufttemperatur sinkt, was ein verstärktes Öffnen der Drosselventile in den Heizkreisen zur Folge hat. Dadurch sinkt der Druckverlust des Netzes, der Massenstrom an die Verbraucher wird wieder erhöht. Somit wird der Fehler zum Teil kompensiert, es kommt zu keinen Komfortverletzungen für den definierten Fall. Eine Untersuchung, ob diese Fehler von den FED-Methoden erkannt werden, steht noch

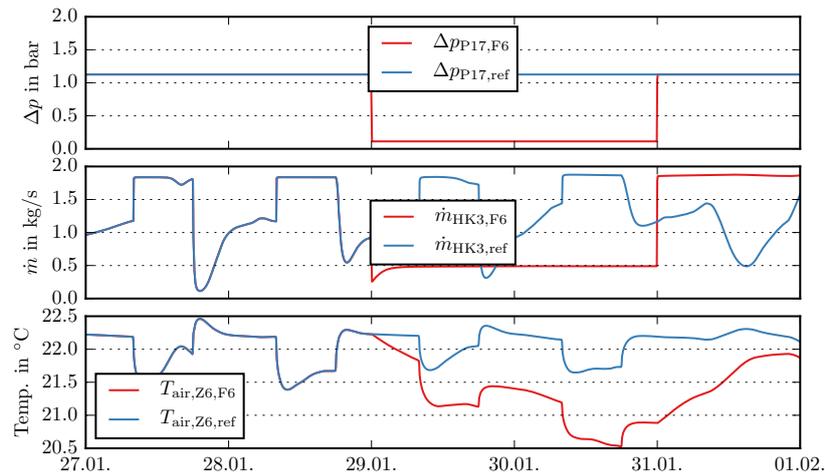


Abbildung 3.57: Auswirkungen der Implementierung von Fehler 6 auf das NT-Heizsystem [28]

aus. Es wird vermutet, dass hierfür die Beobachtung der Drücke und Massen- oder Volumenströme nötig wäre. Da die Erhebung dieser Messpunkte für die Regelung des Gebäudes meist nicht essentiell ist, werden hierfür meist keine Sensoren verbaut.

**Fehler 8, Ausfall der Wärmequelle:** In Abbildung 3.58 wird Fehler 8 und dessen Auswirkungen auf die Niedertemperaturversorgung dargestellt. Am 29.01. um 00 : 00 Uhr wird die Heizleistung der Wärmepumpe für 48 h ausgesetzt (siehe obere Teilgrafik). Da den Heizkreisen keine Wärme mehr zugeführt werden kann, sinkt die Vorlauftemperatur  $T_{HK3,VI,F8}$  stark ab. Innerhalb von 48 h sinkt die Raumlufttemperatur  $T_{air,Z6,F8}$  trotz fehlender Wärmequelle jedoch nur um 2,5 K. Dies kann durch die hohe thermische Kapazität des Gebäudes sowie durch die inneren Wärmequellen von  $10 \text{ W/m}^2$  begründet werden.

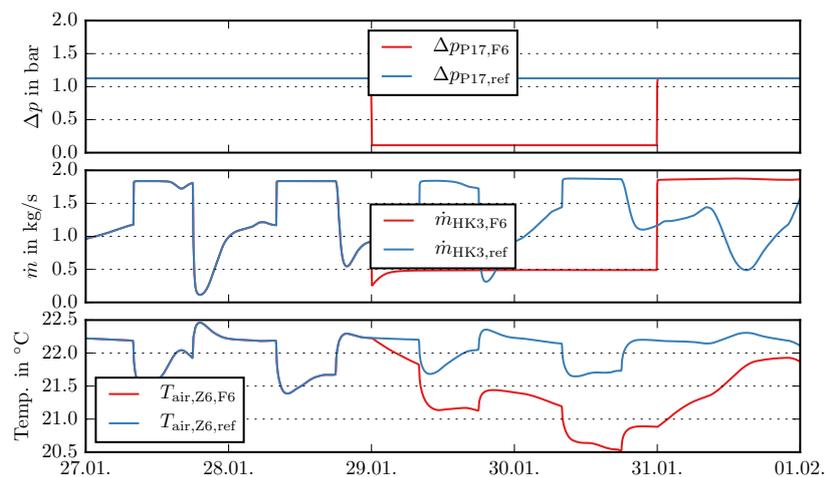


Abbildung 3.58: Auswirkungen der Implementierung von Fehler 8 auf das NT-Heizsystem [28]

Fehler 8 kann einfach anhand der Differenz zwischen Soll- und Istwert der Vorlauftemperatur der Wärmepumpe identifiziert werden. Auch die Sollwerte der Verbraucherkreise können nicht erfüllt werden, wodurch es zu einer Abkühlung der Gebäudezonen

unter das Komfortlimit kommt. Für ein System mit Radiatoren anstelle der TABS würde es zu einer deutlich beschleunigten Abkühlung der Raumlufttemperatur kommen.

### 3.5 Qualitative Modelle zur Fehlererkennung

Sowohl der Text, als auch die Abbildungen dieses Abschnitts 3.5 wurden, soweit nicht anders referenziert, der Dissertation von Thorsten Müller-Eping [30] entnommen.

#### 3.5.1 Einleitung

Qualitative Modelle bieten eine näherungsweise Beschreibung dynamischer Systeme und basieren auf der Betrachtung *quantisierter* Signalwerte. Abbildung 3.59 zeigt die Quantisierung eines reellwertigen und zeitdiskreten Signals (Zeitreihe)  $y \in \mathbb{R}_{\geq 0}$ , hin zu einen wert- und zeitdiskreten Signal  $[y] \in \mathbb{N}$ . Die Notation  $[\cdot]$  bezeichnet somit den quantisierten Signalwert.

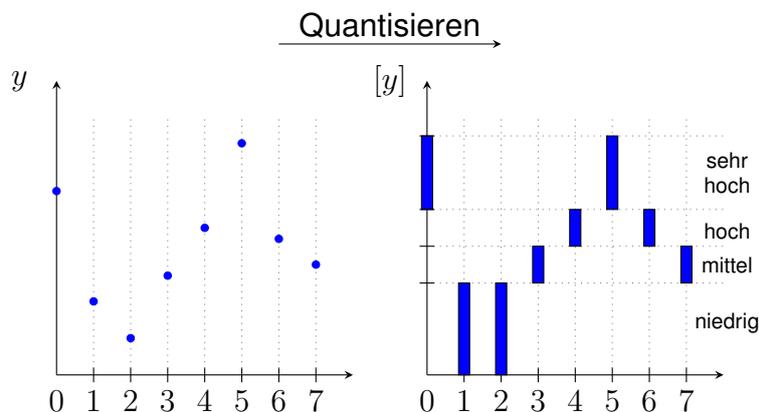


Abbildung 3.59: Signalquantisierung [30]

Als qualitatives Modell wird ein stochastischer Automat verwendet, der die qualitative Systemdynamik einer zugrundeliegenden technischen Anlage in einem wahrscheinlichkeitstheoretischen Kontext beschreibt. Die Fehlererkennung basiert dabei auf dem Prinzip der *qualitativen Zustandsbeobachtung*. Abbildung 3.60 zeigt das Konzept der qualitativen Beobachtung und Fehlererkennung.

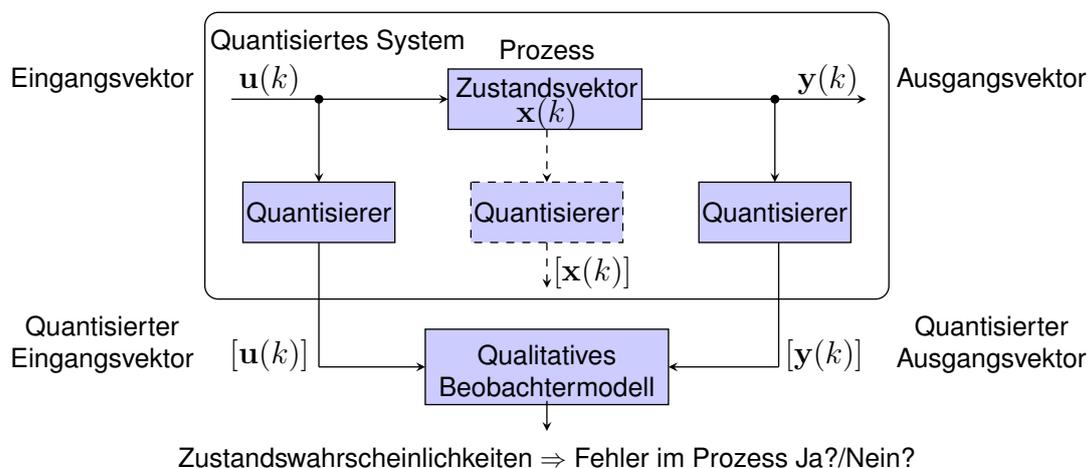


Abbildung 3.60: Qualitative Beobachtung und Fehlererkennung, nach [36, S. 170]

Der in der Mitte der Abbildung 3.60 dargestellte Prozess stellt ein zeitdiskretes und wertkontinuierliches dynamisches System dar, welches für gegebene Eingangsvektoren

ren  $\mathbf{u}(k) \in \mathbb{R}^m$ , die Zustände  $\mathbf{x}(k) \in \mathbb{R}^n$  durchläuft und die Ausgaben  $\mathbf{y}(k) \in \mathbb{R}^Q$  erzeugt. Die Quantisierer bilden diese reellwertigen Vektoren  $\mathbf{u}, \mathbf{x}, \mathbf{y}$  jeweils auf ihre quantisierten Entsprechungen  $[\mathbf{u}], [\mathbf{x}], [\mathbf{y}]$  ab. Der Prozess mit den Quantisierern bildet dabei ein sogenanntes *quantisiertes System*, welches das qualitative Verhalten des Prozesses zeigt [20, S. 4]. Das qualitative Beobachtermodell ist durch den stochastischen Automaten  $\tilde{\mathcal{A}}$  gegeben, der anhand der quantisierten Eingaben  $[\mathbf{u}(k)]$  und der quantisierten Ausgaben  $[\mathbf{y}(k)]$ , die Wahrscheinlichkeiten der quantisierten Zustände bestimmt.

Die qualitative Fehlerdetektion wird in den Folgenden Abschnitten weiter erläutert. Grundlegende Literatur zu stochastischen Automaten und qualitativen Modellen findet sich beispielsweise in [4], [5], [20], [23], [24], [36].

### 3.5.2 Mathematische Grundlagen

Nachfolgend werden die für diesen Abschnitt 3.5 benötigten mathematischen Grundlagen beschrieben. Dabei werden die sogenannten *Tensoren* eingeführt, welche als mehrdimensionale Datenstrukturen interpretiert werden können und als Grundlage der qualitativen Modellrepräsentation dienen. Die im Folgenden verwendeten Notationen für Vektoren, Matrizen und Tensoren sind in Tabelle 3.10 dargestellt.

Tabelle 3.10: Notationen [7], [31]

$A, \mathbf{A}, \mathbf{a}, a$	Tensor, Matrix, Vektor, Skalar
$a_{i_1 i_2 \dots i_N}$ oder $a(i_1, i_2, \dots, i_N)$	$(i_1, i_2, \dots, i_N)$ -tes Element von A
$\mathbf{a}_{:i_2 \dots i_N}$ oder $\mathbf{a}(:, i_2, \dots, i_N)$	Tensorfiber von A, bzw. ein Vektor
$\mathbf{A}_{::i_3 \dots i_N}$ oder $\mathbf{A}(:, :, i_3, \dots, i_N)$	Tensorscheibe von A, bzw. eine Submatrix

#### 3.5.2.1 Vektoren, Matrizen und Tensoren

Abbildung 3.61 veranschaulicht die Vorstellung von Vektoren, Matrizen und Tensoren.

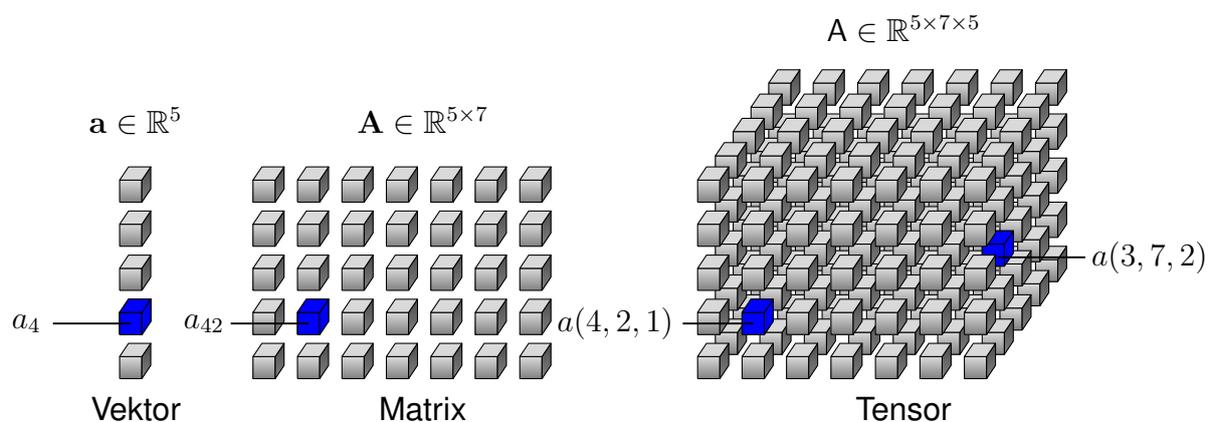


Abbildung 3.61: Vektor, Matrix und ein dreidimensionaler Tensor [9, S. 29], [30]

Während es sich bei Vektoren um eindimensionale und bei Matrizen um zweidimensionale Objekte handelt, können Tensoren grundsätzlich für beliebig viele Dimensionen definiert werden.

**Definition 3.1** (Tensor [9, S. 28]). *Ein Tensor  $N$ -ter Ordnung*

$$\mathbf{A} \in \mathbb{R}^{I_1 \times I_2 \times \dots \times I_N} \quad (3.18)$$

*ist ein  $N$ -dimensionales Array, dessen Elemente  $a(i_1, i_2, \dots, i_N)$  mit  $i_n \in \{1, 2, \dots, I_n\}$  für  $n = 1, 2, \dots, N$  indiziert sind.*

**Index-Operator:** Der sogenannte *Index-Operator* „:“, der bereits in Tabelle 3.10 verwendet wurde, beschreibt die Auswahl *aller* Werte die der jeweilige Index annehmen kann [19, S. 457].

**Beispiel 3.1** (Index-Operator). *Es sei*

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1J} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2J} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{I1} & a_{I2} & \dots & a_{IJ} \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^{I \times J}, \quad (3.19)$$

*eine Matrix mit Elementen  $a_{ij}$ , aus der die  $j$ -te Spalte selektiert werden soll. Mithilfe des Index-Operators schreibt man*

$$\mathbf{a}_{:j} = \begin{pmatrix} a_{1j} \\ a_{2j} \\ \vdots \\ a_{Ij} \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^I. \quad (3.20)$$

**3.5.2.2 Produkte der linearen und multilinearen Algebra** Im Abschnitt 3.5 werden verschiedene Produkte der linearen und multilinearen Algebra benötigt, die im Folgenden definiert werden.

**Definition 3.2** (Matrix-Vektor Produkt). *Das Produkt einer Matrix  $\mathbf{A} \in \mathbb{R}^{I \times J}$  mit Elementen  $a_{ij}$  und eines Spaltenvektors  $\mathbf{b} \in \mathbb{R}^J$  mit Komponenten  $b_j$  resultiert in einem Spaltenvektor  $\mathbf{c} \in \mathbb{R}^I$  der Länge  $I$ :*

$$\mathbf{c} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{b} = \begin{pmatrix} a_{11}b_1 + a_{12}b_2 + \dots + a_{1J}b_J \\ a_{21}b_1 + a_{22}b_2 + \dots + a_{2J}b_J \\ \vdots \\ a_{I1}b_1 + a_{I2}b_2 + \dots + a_{IJ}b_J \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_1 \\ c_2 \\ \vdots \\ c_I \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^I. \quad (3.21)$$

*Elementweise erhält man die Komponenten  $z_i$  des Ergebnisvektors  $\mathbf{z} \in \mathbb{R}^I$  mit*

$$c_i = \sum_{j=1}^J a_{ij} b_j. \quad (3.22)$$

Das *Hadamard-Produkt* ist das elementweise Produkt zweier oder mehrerer dimensionsgleicher Vektoren, Matrizen oder Tensoren.

**Definition 3.3** (Hadamard-Produkt). *Das Hadamard-Produkt zweier Tensoren  $\mathbf{A} \in \mathbb{R}^{I_1 \times I_2 \times \dots \times I_N}$  und  $\mathbf{B} \in \mathbb{R}^{I_1 \times I_2 \times \dots \times I_N}$  ist ein Tensor*

$$\mathbf{C} = \mathbf{A} \otimes \mathbf{B} \in \mathbb{R}^{I_1 \times I_2 \times \dots \times I_N} \quad (3.23)$$

*mit Elementen*

$$c(i_1, i_2, \dots, i_N) = a(i_1, i_2, \dots, i_N) \cdot b(i_1, i_2, \dots, i_N). \quad (3.24)$$

Sind mehrere Tensoren  $N$ -ter Ordnung  $A^{(k)} \in \mathbb{R}^{I_1 \times I_2 \times \dots \times I_N}$  für  $k = 1, \dots, K$  gegeben, dann kann ihr Hadamard-Produkt kompakt notiert werden:

$$C = A^{(1)} \otimes A^{(2)} \otimes \dots \otimes A^{(K)} \in \mathbb{R}^{I_1 \times I_2 \times \dots \times I_N} \quad (3.25)$$

$$= \bigotimes_{k=1}^K A^{(k)} . \quad (3.26)$$

**Definition 3.4** (Dyadisches Vektorprodukt [2, S. 208], [9, S. 34–35]). *Das dyadische Produkt von  $N$  Vektoren, die durch  $\mathbf{a}^{(n)} \in \mathbb{R}^{I_n}$  für  $n = 1, 2, \dots, N$  gegeben sind, ist ein Tensor  $N$ -ter Ordnung*

$$B = \mathbf{a}^{(1)} \circ \mathbf{a}^{(2)} \circ \dots \circ \mathbf{a}^{(N)} \in \mathbb{R}^{I_1 \times I_2 \times \dots \times I_N} . \quad (3.27)$$

mit Elementen

$$b(i_1, i_2, \dots, i_N) = a_{i_1}^{(1)} \cdot a_{i_2}^{(2)} \cdot \dots \cdot a_{i_N}^{(N)} \quad (3.28)$$

und Indizes  $i_n \in \{1, 2, \dots, I_n\}$ .

Weiterführende Informationen zu Tensoren und deren Eigenschaften finden sich in [9], [14], [19].

### 3.5.3 Stochastische Automaten

Die stochastischen Automaten bilden die modelltheoretische Grundlage der qualitativen Modellierung und werden in diesem Abschnitt beschrieben.

**3.5.3.1 Grundlagen** Ein stochastischer Automat  $\mathcal{A}$  kann wie folgt definiert werden:

**Definition 3.5** (Initialer stochastischer Automat [4, S. 380]). *Das 5-Tupel*

$$\mathcal{A} = (\mathcal{Z}, \mathcal{V}, \mathcal{W}, \mathcal{L}, \mathbf{p}_0) , \quad (3.29)$$

mit dem Eingabealphabet  $\mathcal{V}$ , dem Ausgabealphabet  $\mathcal{W}$ , der Zustandsmenge  $\mathcal{Z}$  sowie der Verhaltensrelation  $\mathcal{L}$  und dem initialen Wahrscheinlichkeitsvektor der Zustände  $\mathbf{p}_0$ , heißt initialer stochastischer Automat.

Der stochastische Automat (3.29) kann zum Zeitpunkt  $k$  die Eingaben

$$v(k) \in \mathcal{V} := \{1, 2, \dots, M\} , \quad (3.30)$$

die Zustände

$$z(k) \in \mathcal{Z} := \{1, 2, \dots, N\} \quad (3.31)$$

und die Ausgaben

$$w(k) \in \mathcal{W} := \{1, 2, \dots, Q\} \quad (3.32)$$

annehmen. Die Funktion

$$\mathcal{L} : \mathcal{Z} \times \mathcal{W} \times \mathcal{Z} \times \mathcal{V} \longrightarrow [0, 1] \quad (3.33)$$

beschreibt eine bedingte Wahrscheinlichkeitsverteilung und wird als *Verhaltensrelation* des stochastischen Automaten bezeichnet [27, S. 367], [36, S. 13].

**Definition 3.6** (Verhaltensrelation des stochastischen Automaten [20, S. 42]). *Die Verhaltensrelation des stochastischen Automaten*

$$\mathcal{L}(\bar{z}, w | z, v) = \Pr\left(\begin{array}{l} Z(k+1) = \bar{z}, \\ W(k) = w \end{array} \middle| \begin{array}{l} Z(k) = z, \\ V(k) = v \end{array}\right) \quad (3.34)$$

beschreibt für alle  $\bar{z}, z \in \mathcal{Z}$ ,  $w \in \mathcal{W}$ ,  $v \in \mathcal{V}$  und  $k \in \mathbb{N}$  die bedingte Wahrscheinlichkeit dafür, dass wenn sich der Automat im Zustand  $z$  befindet und die Eingabe  $v$  erhält, er in den Folgezustand  $\bar{z}$  übergeht und die Ausgabe  $w$  erzeugt.

Da die Verhaltensrelation (3.34) des stochastischen Automaten eine bedingte Wahrscheinlichkeitsverteilung darstellt, gelten für diese die Bedingungen [4, S. 380]:

$$\forall \bar{z}, z \in \mathcal{Z}, w \in \mathcal{W}, v \in \mathcal{V} : 0 \leq \mathcal{L}(\bar{z}, w | z, v) \leq 1, \quad (3.35)$$

$$\forall z \in \mathcal{Z}, v \in \mathcal{V} : \sum_{\bar{z}=1}^N \sum_{w=1}^Q \mathcal{L}(\bar{z}, w | z, v) = 1. \quad (3.36)$$

Der außerdem in (3.29) auftretenden Vektor  $\mathbf{p}_0$  repräsentiert die Verteilung der initialen Zustandswahrscheinlichkeiten

$$\mathbf{p}_0 = \begin{pmatrix} \Pr(Z(0) = 1) \\ \Pr(Z(0) = 2) \\ \vdots \\ \Pr(Z(0) = N) \end{pmatrix} \in [0, 1]^N \quad (3.37)$$

des stochastischen Automaten. Der stochastische Automat (3.29) mit der Verhaltensrelation (3.34) kann als eine homogene Markow-Kette mit Ein- und Ausgabe verstanden werden. Der Begriff der Homogenität bezieht sich darauf, dass die auch als Übergangswahrscheinlichkeit bezeichnete Wahrscheinlichkeitsverteilung (3.34), zeitinvariant ist. Da diese Übergangswahrscheinlichkeiten (3.34) zudem nur vom aktuellen Zeitpunkt  $k$  abhängen und nicht von der weiteren Vergangenheit, spricht man auch von einer homogenen Markow-Kette erster Ordnung. Für die weiteren Betrachtungen und Berechnungen werden die Übergangswahrscheinlichkeiten (3.34) in einem Tensor – dem sogenannten *Verhaltenstensor* notiert.

**Definition 3.7** (Verhaltenstensor [32, S. 417]). *Der Tensor*

$$\mathbf{L} \in [0, 1]^{N \times Q \times N \times M} \quad (3.38)$$

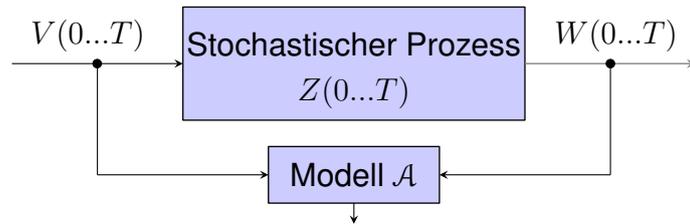
mit den Elementen

$$l(\bar{z}, w, z, v) = \mathcal{L}(\bar{z}, w | z, v) \quad \forall \bar{z}, z \in \mathcal{Z}, w \in \mathcal{W}, v \in \mathcal{V}, \quad (3.39)$$

heißt *Verhaltenstensor*.

**3.5.3.2 Beobachtung** Die Beobachtung stochastischer Automaten bildet die Grundlage der Fehlererkennung und ist in der Literatur ausführlich beschrieben: [4], [26], [36]. Im Folgenden wird eine auf dem Verhaltenstensor (3.7) basierende Beobachtergleichung definiert.

Das Konzept der Zustandsbeobachtung ist in Abbildung 3.62 visualisiert.



$$\Pr(Z(k+1) = \bar{z} \mid V(0..k), W(0..k)), \quad \bar{z} \in \mathcal{Z}, \quad k = 0, 1, \dots, T$$

Abbildung 3.62: Beobachtung eines stochastischen Prozesses durch einen stochastischen Automaten  $\mathcal{A}$  [30]

Die Abbildung zeigt dabei einen homogenen stochastischen Prozess, der für eine bis zum Zeithorizont  $T$  gegebene Eingabefolge

$$V(0..T) = (v(0), v(1), v(2), \dots, v(T)), \quad (3.40)$$

eine Zustandsfolge

$$Z(0..T) = (z(0), z(1), z(2), \dots, z(T)) \quad (3.41)$$

durchläuft und eine Ausgabefolge

$$W(0..T) = (w(0), w(1), w(2), \dots, w(T)) \quad (3.42)$$

erzeugt. Ziel der Zustandsbeobachtung ist die Berechnung der bedingten Zustandswahrscheinlichkeiten

$$\Pr(Z(k+1) = \bar{z} \mid V(0..k), W(0..k)), \quad \bar{z} \in \mathcal{Z}, \quad (3.43)$$

mithilfe des stochastischen Automaten  $\mathcal{A}$ , für alle Zeiten  $k = 0, 1, 2, \dots, T$  (s. Abbildung 3.62), was in der Literatur als *Prädiktion* bezeichnet wird [26, S. 333]. Dies ist die Wahrscheinlichkeitsverteilung der Zustände zur Zeit  $k+1$ , unter der Bedingung, dass bis zur Zeit  $k$  die Eingabefolge  $V(0..k)$  und die Ausgabefolge  $W(0..k)$  durchlaufen wurden. Neben der Wahrscheinlichkeit (3.43) wird häufig auch die aktuelle Zustandswahrscheinlichkeit zur Zeit  $k$  bestimmt, was man *Projektion* bezeichnet [26, S. 333]. Für die hier adressierte Fehlererkennung ist der Projektionsschritt jedoch nicht erforderlich. Anstelle von Ein- und Ausgabefolgen wird im Folgenden kürzer von E/A Folgen gesprochen.

Die Berechnung der gesuchten Zustandswahrscheinlichkeiten (3.43) erfolgt mithilfe des Verhaltenstensors (3.38), was zur Definition der sogenannten *Beobachtergleichung* führt.

**Definition 3.8** (Beobachtergleichung [30]). *Sind die Ein- und Ausgabefolgen  $(V(0..T), W(0..T))$  eines stochastischen Prozesses für einen Zeithorizont  $T$  gegeben und konsistent mit dem stochastischen Automaten  $\mathcal{A}$ , dann erhält man mit*

$$\begin{aligned} k \geq 0 : \quad \mathbf{p}_z(k+1) &= \frac{\mathbf{L}(:, w(k), :, v(k)) \cdot \mathbf{p}_z(k)}{\|\mathbf{L}(:, w(k), :, v(k)) \cdot \mathbf{p}_z(k)\|_1} \in [0, 1]^N, \\ k = 0 : \quad \mathbf{p}_z(0) &:= \mathbf{p}_0, \end{aligned} \quad (3.44)$$

die diskreten Wahrscheinlichkeitsverteilungen der Zustände Zeiten  $k = 0, 1, 2, \dots, T$ .

In Gleichung (3.44) ist  $\mathbf{L}(:, w(k), :, v(k)) \in [0, 1]^{N \times N}$  eine quadratische Submatrix

$$\begin{aligned} & \mathbf{L}(:, w(k), :, v(k)) \\ &= \begin{pmatrix} l(1, w(k), 1, v(k)) & l(1, w(k), 2, v(k)) & \dots & l(1, w(k), N, v(k)) \\ l(2, w(k), 1, v(k)) & l(2, w(k), 2, v(k)) & \dots & l(2, w(k), N, v(k)) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ l(N, w(k), 1, v(k)) & l(N, w(k), 2, v(k)) & \dots & l(N, w(k), N, v(k)) \end{pmatrix} \in [0, 1]^{N \times N}. \end{aligned} \quad (3.45)$$

Initialisiert mit der Startverteilung (3.37) erhält man durch rekursive Anwendung der Beobachtergleichung (3.44), die gesuchten Zustandswahrscheinlichkeiten (3.43) in Form der Zustandswahrscheinlichkeitsvektoren

$$\mathbf{p}_z(k+1) = \begin{pmatrix} \Pr(Z(k+1) = 1 | V(0..k), W(0..k)) \\ \Pr(Z(k+1) = 2 | V(0..k), W(0..k)) \\ \vdots \\ \Pr(Z(k+1) = N | V(0..k), W(0..k)) \end{pmatrix} \in [0, 1]^N \quad (3.46)$$

für  $k = 0, 1, 2, \dots, T$ . Diese können in einer Vektorfolge

$$\mathbf{P}_z(0..T+1 | V(0..T), W(0..T)) = (\mathbf{p}_z(0), \mathbf{p}_z(1), \mathbf{p}_z(2), \dots, \mathbf{p}_z(T+1)). \quad (3.47)$$

zusammengefasst werden.

**3.5.3.3 Fehlererkennung** Die Tensor-Beobachtergleichung aus Definition 3.8 bildet die Basis für die Fehlererkennung, die auf einer *Konsistenzprüfung* basiert. Die Beobachtergleichung (3.44) ist nur dann anwendbar, solange die Ein- und Ausgabefolgen  $V(0..T)$  und  $W(0..T)$  konsistent mit dem Modell, beziehungsweise dem stochastischen Automaten  $\mathcal{A}$  sind (vgl. Abbildung 3.62). Was dies im Detail bedeutet, wird im Folgenden erläutert.

Neben den Verteilungen der Zustandswahrscheinlichkeiten (3.47), liefert die Beobachtergleichung (3.44) auch die Wahrscheinlichkeit einer gegebenen E/A Folge, die mit

$$\Pr(W(0..T) | V(0..T)) \quad (3.48)$$

bezeichnet wird [4, S. 386]. Dabei handelt es sich um die bedingte Wahrscheinlichkeit dafür, dass der Automat die Ausgabefolge  $W(0..T)$  erzeugt, wenn er die Eingabefolge  $V(0..T)$  erhält. Die Berechnung dieser Wahrscheinlichkeit erfolgt anhand des Nenners der Beobachtergleichung (3.44), der für die weitere Betrachtung wie folgt abgekürzt wird:<sup>1</sup>

$$b(k) := \|\mathbf{L}(:, w(k), :, v(k)) \cdot \mathbf{p}_z(k)\|_1 \in [0, 1] \quad (3.49)$$

Die Beobachtergleichung (3.44) generiert damit für eine konsistente E/A Folge die Werte  $b(k)$  für Zeiten  $k = 0, 1, 2, \dots, T$ , was zu einer Folge von Skalaren führt:

$$B(0..T | V(0..T), W(0..T)) = (b(0), b(1), b(2), \dots, b(T)). \quad (3.50)$$

<sup>1</sup>Die Notation  $\|\cdot\|_1$  steht für die Summennorm. Diese ist definiert als  $\|\mathbf{a}\|_1 := \sum_{i=1}^I |a_i|$ , für  $\mathbf{a} \in \mathbb{R}^I$

Diese Folge wird im Folgenden als *Verhaltensfolge* oder *Verhaltenssignal* bezeichnet. Die gesuchte Wahrscheinlichkeit einer E/A Folge (3.48) ist dann gegeben durch

$$\Pr(W(0...T) | V(0...T)) = \prod_{k=0}^T b(k) . \quad (3.51)$$

Davon ausgehend, dass der stochastische Automat als Modell  $\mathcal{A}$  das nominale Verhalten des stochastischen Prozesses vollständig beschreibt, kann die Beobachtergleichung (3.44) für eine konsistenzbasierte Fehlererkennung verwendet werden. Entscheidend für diese Bewertung ist dabei die Analyse des Nenners der Beobachtergleichung (3.44), der durch die Variable  $b(k)$  aus (3.49) beschrieben wird. Die Variable  $b(k)$ , beziehungsweise die Verhaltensfolge  $B(0...T|V(0...T), W(0...T))$ , bilden somit die Grundlage der Konsistenzbewertung der E/A Folgen und damit auch die Basis für die Fehlererkennung.

Eine E/A Folge  $(V(0...T), W(0...T))$  mit den E/A Paaren  $(v(k), w(k))$  ist *konsistent* mit dem stochastischen Automaten  $\mathcal{A}$ , wenn für die Elemente  $b(k)$  der Verhaltensfolge  $B$ , folgendes gilt [32, S. 417], [30]:

$$\forall k : b(k) > 0 . \quad (3.52)$$

Aus der Beobachtergleichung (3.44) erhält man dann die Folge der Zustandswahrscheinlichkeitsverteilungen (3.47) sowie die Verhaltensfolge (3.50) und es gilt für die Wahrscheinlichkeit der E/A Folge  $\Pr(W(0...T) | V(0...T)) > 0$ .

Eine E/A Folge  $(V(0...T), W(0...T))$  mit E/A Paaren  $(v(k), w(k))$  ist hingegen *inkonsistent* mit dem stochastischen Automaten  $\mathcal{A}$ , wenn für die Elemente  $b(k)$  der Verhaltensfolge  $B$  folgendes gilt [32, S. 417], [30]:

$$\exists k : b(k) = 0 . \quad (3.53)$$

In diesem Fall ist die Wahrscheinlichkeit der E/A Folge null ( $\Pr(W(0...T) | V(0...T)) = 0$ ). Ein inkonsistentes E/A Paar, für das  $b(k) = 0$  gilt, führt im Nenner der Beobachtergleichung (3.44) zu einer Division durch null, weshalb die Berechnung an diesem Punkt abgebrochen werden muss.

### 3.5.4 Qualitatives Modell

Dieser Abschnitt führt die qualitative Modellierung auf Basis der stochastischen Automaten ein.

**3.5.4.1 Quantisierung** Als Quantisierung wird eine Methode bezeichnet, mit der die reellwertigen Eingangs-, Zustands-, und Ausgangsgrößen eines zeitdiskreten dynamischen Systems, auf eine einzelne skalare Größe, abgebildet werden.

Die Quantisierung der reellwertigen Signale Eingangs-, Ausgangs- und Zustandssignale erfolgt durch eine rechtwinklige Partitionierung des entsprechenden Eingangs-, Zustands-, und Ausgangsräume. Dabei wird jeder dieser Signale in eine theoretisch beliebige Anzahl von Mengen  $\mathcal{O}_u(v)$ ,  $\mathcal{O}_x(z)$  und  $\mathcal{O}_y(w)$  partitioniert, wobei beispielsweise für dem Ausgangsraum [25, S. 397]

$$\forall i \neq j, i, j \in \mathcal{Y} : \mathcal{O}_y(i) \cap \mathcal{O}_y(j) = \emptyset , \quad (3.54)$$

$$\bigcup_{i \in \mathcal{Y}} \mathcal{O}_y(i) = \mathbb{R}^m , \quad (3.55)$$

gilt. Durch diese Partitionierungen ergeben sich die Äquivalenzbeziehungen [20, S. 9]

$$[\mathbf{u}(k)] = v(k) \iff \mathbf{u}(k) \in \mathcal{O}_u(v), \quad (3.56)$$

$$[\mathbf{x}(k)] = z(k) \iff \mathbf{x}(k) \in \mathcal{O}_x(z), \quad (3.57)$$

$$[\mathbf{y}(k)] = w(k) \iff \mathbf{y}(k) \in \mathcal{O}_y(w). \quad (3.58)$$

Die qualitativen Werte der quantisierten Eingaben  $[\mathbf{u}(k)]$ , Zustände  $[\mathbf{x}(k)]$  und Ausgaben  $[\mathbf{y}(k)]$  sind damit durch die *qualitativen Eingaben*  $v(k) \in \mathcal{V}$ , die *qualitativen Zustände*  $z(k) \in \mathcal{X}$  und die *qualitativen Ausgaben*  $w(k) \in \mathcal{Y}$  definiert. Die Mengen

$$\mathcal{V} := \{1, 2, \dots, M\}, \quad (3.59)$$

$$\mathcal{X} := \{1, 2, \dots, N\}, \quad (3.60)$$

$$\mathcal{Y} := \{1, 2, \dots, Q\}, \quad (3.61)$$

bezeichnet man als qualitativen Eingangs-, Zustands-, und Ausgangsraum [21, S. 888]. Das folgende Beispiel veranschaulicht die Quantisierung.

**Beispiel 3.2** (Quantisierung). Die Abbildung 3.63 zeigt eine mögliche rechtwinklige Partitionierung eines zweidimensionalen Ausgangsraumes  $\mathbb{R}^2$ . Der Vektor der Ausgangsgröße  $\mathbf{y} \in \mathbb{R}^2$  des zeitdiskreten dynamischen Systems repräsentiert damit zwei Ausgangssignale  $y_1 \in \mathbb{R}$  und  $y_2 \in \mathbb{R}$ . Die Quantisierung erfolgt nun anhand des in Abbildung 3.63 dargestellten Enumerationsschemas, mit dem die  $R = 6$  Partitionierungen  $\mathcal{O}_y(1), \dots, \mathcal{O}_y(6)$  nummeriert sind. Der qualitative Ausgangsraum ist somit definiert durch  $\mathcal{Y} := \{1, 2, \dots, 6\}$ , was bedeutet, dass die qualitative Ausgangsgröße  $[\mathbf{y}]$  sechs verschiedene qualitative Ausgabewerte  $w \in \mathcal{Y}$  annehmen kann.

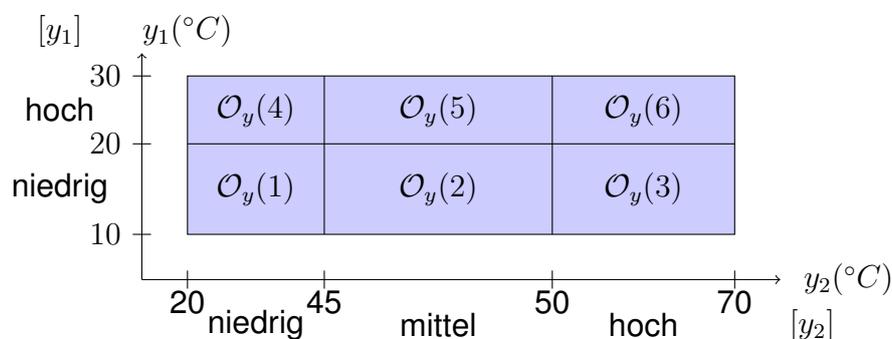


Abbildung 3.63: Partitionierung eines zweidimensionalen Ausgangsraum  $\mathbb{R}^2$

Ist nun beispielsweise die vektorielle reellwertige Eingangsfolge

$$\mathbf{Y}(0\dots 4) = \left( \begin{pmatrix} 15 \\ 47 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 25 \\ 55 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 12 \\ 60 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 18 \\ 30 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 27 \\ 35 \end{pmatrix} \right) \quad (3.62)$$

gegeben, dann können die qualitativen Ausgabewerte mithilfe des Enumerationsschemas unmittelbar abgelesen werden. Der Ausgangsvektor  $\mathbf{y}(0) = (15 \ 47)^T$  liegt beispielsweise in der Menge  $\mathcal{O}_y(2)$ , womit der qualitative Wert  $w$  der quantisierten Ausgabe  $[\mathbf{y}(0)]$  durch  $[\mathbf{y}(0)] = 2$  gegeben ist. Für die reellwertige Folge (3.62) erhält man damit die quantisierte Ausgangsfolge

$$[\mathbf{Y}(0\dots 4)] = (2, 6, 3, 1, 4). \quad (3.63)$$

**3.5.4.2 Qualitative Modellbeschreibung** Die Grundlage des qualitativen Modells bildet der initiale stochastischer Automat (3.29), dessen Eingabemenge  $\mathcal{V}$ , Ausgabemenge  $\mathcal{W}$  und Zustandsmenge  $\mathcal{Z}$  durch die entsprechenden qualitativen Eingangs-, Zustands- und Ausgangsräume definiert sind:

$$\mathcal{V} = \mathcal{U}, \quad \mathcal{W} = \mathcal{Y}, \quad \mathcal{Z} = \mathcal{X}. \quad (3.64)$$

Die Automateingaben, -zustände und -ausgaben sind bestimmt durch die quantisierten Eingaben  $[\mathbf{u}(k)] = v(k)$ , Zustände  $[\mathbf{x}(k)] = z(k)$  und Ausgaben  $[\mathbf{y}(k)] = w(k)$  des quantisierten Systems. Damit kann das qualitative Modell wie folgt definiert werden.

**Definition 3.9** (Qualitatives Modell [20, S. 47]). *Der initiale stochastische Automat*

$$\tilde{\mathcal{A}} = (\mathcal{X}, \mathcal{U}, \mathcal{Y}, \tilde{\mathcal{L}}, \tilde{\mathbf{p}}_0), \quad (3.65)$$

mit der Verhaltensrelation

$$\tilde{\mathcal{L}}(\bar{z}, w | z, v) = \Pr \left( \begin{array}{l} [\mathbf{x}(k+1)] = \bar{z} \\ [\mathbf{y}(k)] = w \end{array} \middle| \begin{array}{l} [\mathbf{x}(k)] = z \\ [\mathbf{u}(k)] = v \end{array} \right), \quad (3.66)$$

wird als qualitatives Modell des quantisierten Systems bezeichnet.

Die Verhaltensrelation  $\tilde{\mathcal{L}}$  des qualitativen Modells  $\tilde{\mathcal{A}}$  beschreibt näherungsweise die Wahrscheinlichkeit dafür, dass wenn sich das quantisierte System im qualitativen Zustand  $z$  befindet und die qualitative Eingabe  $v$  erhält, es die qualitative Ausgabe  $w$  erzeugt und in den qualitativen Nachfolgezustand  $\bar{z}$  übergeht. Da es sich bei der bedingten Wahrscheinlichkeit (3.66) nur um eine Approximation handelt, ist der Tatsache geschuldet, dass reale Systeme im Allgemeinen die Markow-Eigenschaft nicht besitzen. Die bedingten Wahrscheinlichkeiten der Verhaltensrelation des qualitativen Modells können wiederum in einem Verhaltenstensor zusammen gefasst werden.

**Definition 3.10** (Verhaltenstensor des qualitativen Modells). *Der Tensor*

$$\tilde{\mathcal{L}} \in [0, 1]^{N \times Q \times N \times M}, \quad (3.67)$$

für dessen Elemente

$$\tilde{l}(\bar{z}, w, z, v) = \tilde{\mathcal{L}}(\bar{z}, w | z, v) \quad \forall \bar{z}, z \in \mathcal{X}, w \in \mathcal{Y}, v \in \mathcal{V} \quad (3.68)$$

gilt, heißt Verhaltenstensor des qualitativen Modells.

Der außerdem in (3.65) auftretende initiale Vektor

$$\tilde{\mathbf{p}}_0 = \begin{pmatrix} \Pr([\mathbf{x}(0)] = 1) \\ \Pr([\mathbf{x}(0)] = 2) \\ \vdots \\ \Pr([\mathbf{x}(0)] = N) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1/N \\ 1/N \\ \vdots \\ 1/N \end{pmatrix} \in [0, 1]^N \quad (3.69)$$

repräsentiert die Wahrscheinlichkeiten der qualitativen Zustände zur Zeit  $k = 0$ , wobei eine Gleichverteilung angenommen wird.

**3.5.4.3 Qualitative Modellbildung** In der Literatur existieren unterschiedliche Verfahren zur Identifizierung qualitativer Modelle, s. [20], [36]. Die hier verwendete Methode der *stochastischen qualitativen Identifikation* stellt ein Black-Box Verfahren dar, mit dem ein qualitatives Modell anhand von Messdaten identifiziert werden kann. Die Methode wird hier nicht im Detail beschrieben und kann der Referenz [20, S. 53] entnommen werden.

**3.5.4.4 Qualitative Beobachtung** Die qualitative Beobachtung erfolgt analog zur Beobachtung des stochastischen Automaten (3.29) und ist in Abbildung 3.64 gezeigt.

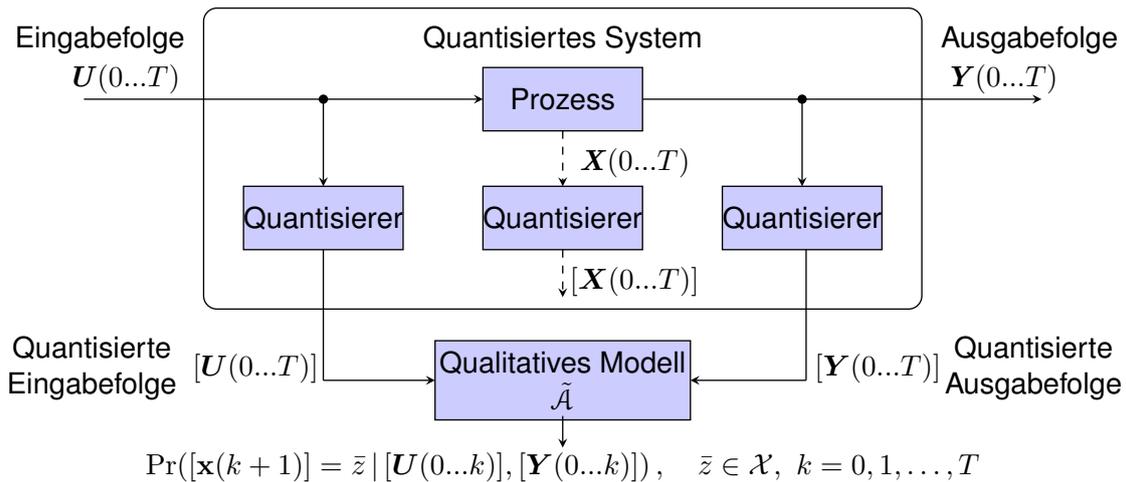


Abbildung 3.64: Qualitative Beobachtung [30]

Wie auch bei stochastischen Automaten in Abschnitt 3.5.3, werden in diesem Abschnitt anstelle einzelner quantisierter Eingaben  $[\mathbf{u}(k)]$ , Zustände  $[\mathbf{x}(k)]$  und Ausgaben  $[\mathbf{y}(k)]$ , Folgen dieser Werte betrachtet, die für  $k = 0, 1, 2, \dots, T$  gegeben seien. Man spricht hierbei von einer quantisierten oder qualitativen Eingangsfolge

$$[\mathbf{U}(0...T)] = ([\mathbf{u}(0)], [\mathbf{u}(1)], [\mathbf{u}(2)], \dots, [\mathbf{u}(T)]) , \quad (3.70)$$

einer Zustandsfolge

$$[\mathbf{X}(0...T)] = ([\mathbf{x}(0)], [\mathbf{x}(1)], [\mathbf{x}(2)], \dots, [\mathbf{x}(T)]) \quad (3.71)$$

und Ausgangsfolge

$$[\mathbf{Y}(0...T)] = ([\mathbf{y}(0)], [\mathbf{y}(1)], [\mathbf{y}(2)], \dots, [\mathbf{y}(T)]) . \quad (3.72)$$

**Definition 3.11** (Qualitative Beobachtergleichung). *Sind die quantisierten E/A Folgen  $([\mathbf{U}(0...T)], [\mathbf{Y}(0...T)])$  des quantisierten Systems für einen Zeithorizont  $T$  gegeben und konsistent mit dem qualitativen Modell  $\tilde{\mathbf{A}}$ , dann erhält man mit*

$$\begin{aligned} k \geq 0 : \quad \tilde{\mathbf{p}}_z(k+1) &= \frac{\tilde{\mathbf{L}}(:, w(k), :, v(k)) \cdot \tilde{\mathbf{p}}_z(k)}{\|\tilde{\mathbf{L}}(:, w(k), :, v(k)) \cdot \tilde{\mathbf{p}}_z(k)\|_1} \in [0, 1]^N , \\ k = 0 : \quad \tilde{\mathbf{p}}_z(0) &= \tilde{\mathbf{p}}_0 , \end{aligned} \quad (3.73)$$

eine Approximation der Wahrscheinlichkeitsverteilungen der qualitativen Zustände alle Zeiten  $k = 0, 1, 2, \dots, T$ . Die qualitativen Eingaben  $v(k)$  und Ausgaben  $w(k)$  sind dabei in jedem Zeitschritt  $k$  durch die Werte der quantisierten Eingaben  $[\mathbf{u}(k)] = v(k)$  und Ausgaben  $[\mathbf{y}(k)] = w(k)$  gegeben.

In Gleichung (3.73) ist  $\tilde{\mathbf{L}}(:, w(k), :, v(k)) \in [0, 1]^{N \times N}$  wiederum eine Submatrix des Verhaltenstensors (3.68) und der Vektor  $\tilde{\mathbf{p}}_0$  repräsentiert die initialen qualitativen Zustandswahrscheinlichkeiten (3.69). Mit Gleichung (3.73) erhält man für  $k = 0, 1, \dots, T$  die Wahrscheinlichkeitsvektoren der qualitativen Zustände

$$\tilde{\mathbf{p}}_z(k+1) = \begin{pmatrix} \Pr([\mathbf{x}(k+1)] = 1 \mid [\mathbf{U}(0\dots k)], [\mathbf{Y}(0\dots k)]) \\ \Pr([\mathbf{x}(k+1)] = 2 \mid [\mathbf{U}(0\dots k)], [\mathbf{Y}(0\dots k)]) \\ \vdots \\ \Pr([\mathbf{x}(k+1)] = N \mid [\mathbf{U}(0\dots k)], [\mathbf{Y}(0\dots k)]) \end{pmatrix} \in [0, 1]^N, \quad (3.74)$$

die wiederum in einer Vektorfolge

$$\tilde{\mathbf{P}}_z(0\dots T+1 \mid [\mathbf{U}(0\dots T)], [\mathbf{Y}(0\dots T)]) = (\tilde{\mathbf{p}}_z(0), \tilde{\mathbf{p}}_z(1), \tilde{\mathbf{p}}_z(2), \dots, \tilde{\mathbf{p}}_z(T+1)) \quad (3.75)$$

zusammengefasst werden können. Der Nenner der qualitativen Beobachtergleichung (3.73) wird erneut mit

$$\tilde{b}(k) := \left\| \tilde{\mathbf{L}}(w(k), v(k)) \cdot \tilde{\mathbf{p}}_z(k) \right\|_1 \in [0, 1], \quad (3.76)$$

abgekürzt, womit man wie in (3.50) für  $k = 0, 1, 2, \dots, T$ , das für die Fehlererkennung wichtige Verhaltenssignal

$$\tilde{\mathbf{B}}(0\dots T \mid [\mathbf{U}(0\dots T)], [\mathbf{Y}(0\dots T)]) = (\tilde{b}(0), \tilde{b}(1), \tilde{b}(2), \dots, \tilde{b}(T)) \quad (3.77)$$

erhält [30].

Die Konsistenzprüfung, ob die qualitativen E/A Folgen ( $[\mathbf{U}(0\dots T)], [\mathbf{Y}(0\dots T)]$ ) konsistent mit dem qualitativen Modell  $\hat{\mathcal{A}}$  sind, erfolgt analog zur Beschreibung in Abschnitt 3.5.3.3. Im nächsten Abschnitt wird beschrieben, wie die qualitative Fehlererkennung realisiert und ein entsprechender Algorithmus aufgestellt werden kann.

**3.5.4.5 Qualitative Fehlererkennung** Da das Verhaltenssignal (3.77) ein stochastisches Signal ist, welches aufgrund von mehr oder weniger wahrscheinlichen E/A Paaren zwischen null und eins schwankt, bietet es sich an, dieses Signal für die praktische Anwendung, weiter zu verarbeiten. Das Verhaltenssignal, welches die Grundlage der Fehlererkennung bildet, soll dabei die im Folgenden aufgeführten Bedingungen erfüllen.

1. **Einstellbare Sensitivität** [30]: In der Regel sollte es vermieden werden, bereits einzelne oder einige wenige inkonsistente E/A Paare direkt als Fehler zu klassifizieren und diese dem Betreiber oder Nutzer der entsprechenden technischen Anlage zu melden. Der Algorithmus zur Fehlererkennung soll dementsprechend in seiner Sensitivität justierbar sein, damit in Abhängigkeit des zugrundeliegenden Prozess, den Abtastzeiten und den Nutzerbedürfnissen, eingestellt werden kann, nach wie vielen inkonsistenten E/A Paaren tatsächlich eine Fehlermeldung generiert oder visualisiert werden soll. Diese Anforderung lässt sich durch die Einführung eines einfachen ungewichteten gleitenden Mittelwertes

$$\tilde{b}_m(k) = \frac{1}{\phi} \sum_{j=0}^{\phi-1} \tilde{b}(k-j) \in [0, 1] \quad (3.78)$$

realisieren. Darin ist  $\phi$  die *Fensterbreite*, also die einstellbare Anzahl zurückliegender Zeitschritte aus denen der aktuelle Mittelwert  $\tilde{b}_m(k)$  gebildet wird. Aus Gleichung (3.78) kann dann für  $k = 0, 1, 2, \dots, T$ , die Folge

$$\tilde{B}_m(0\dots T) = (\tilde{b}_m(0), \tilde{b}_m(1), \tilde{b}_m(2), \dots, \tilde{b}_m(T)) \quad (3.79)$$

gebildet werden.

2. **Gute Interpretierbarkeit des Verhaltenssignals** [30]: Da es sich bei dem Signal  $\tilde{B}_m$  um ein stochastisches Signal handelt, schwanken dessen Werte aufgrund von mehr oder weniger wahrscheinlichen E/A Paaren zwischen null und eins. Zur Verbesserung der Interpretierbarkeit wird ein einfacher Grenzwert  $\tau \in [0, 1)$  eingeführt, der die Signalwerte  $\tilde{b}_m(k)$  für  $k = 0, 1, 2, \dots, T$ , mit

$$\tilde{b}_b(k) = \begin{cases} 1 & \text{wenn } \tilde{b}_m(k) > \tau, \\ 0 & \text{sonst,} \end{cases} \quad (3.80)$$

auf die booleschen Werte  $\tilde{b}_b(k) \in \{0, 1\}$  abbildet. Dabei bedeutet  $\tilde{b}_b(k) = 0$ , dass ein Fehler oder ein nicht nominaler Betriebszustand vorliegt und  $\tilde{b}_b(k) = 1$ , dass sich das zugrundeliegende System im Nominalbetrieb befindet. Im folgenden gilt solange nicht anders erwähnt  $\tau = 0$ , da nur tatsächlich inkonsistente E/A Paare auch als Fehler klassifiziert werden sollen. Dem Grenzwert  $\tau$  kommt dabei noch eine weitere Bedeutung zu, die in Abschnitt 3.5.5 erläutert wird. Wendet man (3.80) nun für  $k = 0, 1, 2, \dots, T$  auf die Signalwerte  $\tilde{b}_m(k)$  an, erhält man die boolesche Folge

$$\tilde{B}_b(0\dots T) = (\tilde{b}_b(0), \tilde{b}_b(1), \tilde{b}_b(2), \dots, \tilde{b}_b(T)) . \quad (3.81)$$

Unter Berücksichtigung der oben getroffenen Anforderungen an die Fehlerdetektion, kann auf Grundlage der Beobachtergleichung (3.73) ein entsprechender Algorithmus formuliert werden.

Der Beobachteralgorithmus 3.1 läuft dabei wie folgt ab: Die Initialisierung erfolgt zur Zeit  $k = 0$  mit der Startverteilung  $\tilde{\mathbf{p}}_z(0) := \tilde{\mathbf{p}}_0$ . Wenn nun die Eingangsbedingung in Schritt 1 erfüllt ist wird in Schritt 2 zunächst der Zähler der Beobachtergleichung (3.73) berechnet. In Schritt 3 erfolgt die Bestimmung von  $\tilde{b}(k)$  auf Basis des Nenners der Beobachtergleichung. Im vierten Schritt wird der gleitende Mittelwert  $\tilde{b}_m(k)$  sowie der boolesche Wert  $\tilde{b}_b(k)$  bestimmt. Anschließend folgt in Schritt 5 die Prüfung, ob das E/A Paar  $(v(k), w(k))$  inkonsistent ist. Trifft dies zu, wird dem Zustandsvektor  $\tilde{\mathbf{p}}_z(k + 1)$  für diesen Zeitschritt  $k$  die initiale Startverteilung  $\tilde{\mathbf{p}}_0$  zugewiesen (s. a. Anmerkung ??). Anschließend wird der Zeitindex mit  $k := k + 1$  um einen Wert verschoben und die Prozedur startet wieder in Schritt 1. Durch die Schritte 6 und 7 wird damit sichergestellt, dass ein inkonsistentes E/A Paar in der Beobachtergleichung (3.73) nicht zu einer Division durch null und damit zum Abbruch des Algorithmus führt. Gilt in Schritt 5 hingegen  $\tilde{b}(k) > 0$ , dann ist das E/A Paar konsistent mit dem Modell und die Berechnung des Vektors  $\tilde{\mathbf{p}}_z(k + 1)$  erfolgt in Schritt 9 mit der Beobachtergleichung (3.73). Anschließend wird der Zeitindex mit  $k := k + 1$  um einen Wert verschoben und die Prozedur startet wieder in Schritt 1. Die Ausführung dieser Schleife erfolgt dann solange bis  $k = T$  gilt und alle E/A Paare prozessiert wurden. Als Ergebnis des Beobachteralgorithmus erhält man die Folge der Zustandsvektoren  $\tilde{\mathbf{P}}_z$  sowie die Verhaltenssignale  $\tilde{B}$ ,  $\tilde{B}_m$  und  $\tilde{B}_b$ .

---

**Algorithmus 3.1:** Algorithmus zur qualitativen Fehlerdetektion [30]
 

---

**Gegeben:** Qualitatives Modell  $\tilde{A}$  und Verhaltenstensor  $\tilde{L}$   
 Qualitative Eingabefolge  $[U(0\dots T)]$  mit Elementen  $[u(k)] = v(k)$   
 Qualitative Ausgabefolge  $[Y(0\dots T)]$  mit Elementen  $[y(k)] = w(k)$

**Initialisiere:**  $k = 0, \tilde{p}_z(0) := \tilde{p}_0$

**Iteriere:**

- 1 **solange**  $0 \leq k \leq T$
- 2     **berechne**  $\tilde{L}(:, w(k), :, v(k)) \cdot \tilde{p}_z(k)$  Gl. (3.73)
- 3     **berechne**  $\|\tilde{L}(:, w(k), :, v(k)) \cdot \tilde{p}_z(k)\|_1 =: \tilde{b}(k)$ , Gl. (3.73)
- 4     **berechne**  $\tilde{b}_m(k)$ , Gl. (3.78) und  $\tilde{b}_b(k)$ , Gl. (3.80)
- 5     **wenn**  $\tilde{b}(k) = 0$  **dann**
- 6         **setze**  $\tilde{p}_z(k+1) = \tilde{p}_0$
- 7         **setze**  $k := k + 1$  und fahre fort mit Schritt 1
- 8     **sonst**
- 9         **berechne**  $\tilde{p}_z(k+1)$ , Gl. (3.73)
- 10        **setze**  $k := k + 1$  und fahre fort mit Schritt 1

**Ergebnis:** Folge  $\tilde{P}_z(0\dots T+1 | [U(0\dots T)], [Y(0\dots T)])$ , Gl. (3.75)  
 Folge  $\tilde{B}(0\dots T | [U(0\dots T)], [Y(0\dots T)])$ , Gl. (3.77)  
 Folge  $\tilde{B}_m(0\dots T)$ , Gl. (3.79)  
 Folge  $\tilde{B}_b(0\dots T)$ , Gl. (3.81)

---

**3.5.4.6 Speicherbedarf qualitativer Modelle** Das größte Hindernis bei der praktischen Anwendung qualitativer Modelle zur Fehlerdetektion, ist ihr sehr großer Speicherbedarf, was in Tabelle 3.11 dargestellt ist.

Tabelle 3.11: Speicherbedarf qualitativer Modelle [30]

Anzahl Zustandsgrößen	Qual. Werte pro Zustandsgröße	Anzahl Eingangsgrößen	Qual. Werte pro Eingangsgröße	Anzahl Ausgangsgrößen	Qual. Werte pro Ausgangsgröße	Speicherbedarf des qual. Modells
1	3	1	4	1	3	$3^{2 \cdot 1} \cdot 4^1 \cdot 3^1 = 108$
2	4	2	5	2	6	$4^{2 \cdot 2} \cdot 5^2 \cdot 6^2 = 230\,400$
4	4	5	5	3	4	$4^{2 \cdot 4} \cdot 5^5 \cdot 4^3 = 1.31072 \cdot 10^{10}$

Grundsätzlich kann der Speicherbedarf qualitativer Modell auch mit der Gleichung

$$\alpha = N^2 \cdot Q \cdot M \quad (3.82)$$

berechnet werden. Dabei ist  $N$  die Gesamtanzahl der qualitativen Zustände,  $Q$  die Anzahl der qualitativen Ausgaben und  $M$  entspricht der Anzahl der qualitativen Eingaben. In der zweiten Zeile der Tabelle 3.11 gilt somit  $N = 16$ ,  $M = 25$  und  $Q = 36$  und man erhält mit (3.82) die Anzahl zu speichernder Werte  $\alpha = 16^2 \cdot 36 \cdot 25 = 230\,400$ .

Wie die Tabelle 3.11 zeigt, ist der Speicherbedarf selbst für kleinere Systeme mit nur wenigen Eingangs- Zustands- und Ausgangsgrößen bereits sehr hoch. Eine effiziente

Speicherung oder Implementierung der Modelle in die Gebäudeleitsysteme, ist damit nur schwer möglich. Im Folgenden wird eine Methode zur Modellreduktion vorgestellt, die es ermöglicht, den Speicherbedarf qualitativer Modelle zur Fehlererkennung soweit zu minimieren, dass diese auch in komplexen Gebäudesystemen anwendbar sind.

### 3.5.5 Qualitative Modelle in dekomponierter Tensorrepräsentation

In diesem Abschnitt wird gezeigt wie der Verhaltenstensor des stochastischen Automaten (3.38) und des qualitativen Modells (3.67) mithilfe der Methode der Tensordekomposition zerlegt und in seinem Speicherbedarf reduziert werden kann. Die Erläuterung der Berechnungen erfolgt anhand des Verhaltenstensors des stochastischen Automaten (3.38) und gilt analog für das qualitative Modell.

**3.5.5.1 CP-Tensordekomposition** Die CP-Dekomposition ist ein Verfahren, bei dem ein  $N$ -dimensionaler Tensor, in eine Anzahl von  $N$  sogenannten *Faktormatrizen* zerlegt wird. Grundlegende Informationen zur CP-Dekomposition finden sich in [8], [9], [19].

**Definition 3.12** (CP-Dekomposition [19, S. 463–464]). *Die CP-Dekomposition eines Tensors  $N$ -ter Ordnung  $E \in \mathbb{R}^{I_1 \times I_2 \times \dots \times I_N}$ , ist definiert als dessen Zerlegung in eine Summe von  $R$  Rang-1 Tensoren*

$$E \approx \left[ \boldsymbol{\lambda}; \mathbf{F}^{(1)}, \mathbf{F}^{(2)}, \dots, \mathbf{F}^{(N)} \right] \equiv \sum_{r=1}^R \lambda_r \mathbf{f}_{:r}^{(1)} \circ \mathbf{f}_{:r}^{(2)} \circ \dots \circ \mathbf{f}_{:r}^{(N)} \in \mathbb{R}^{I_1 \times I_2 \times \dots \times I_N}, \quad (3.83)$$

die für  $n = 1, \dots, N$  durch die dyadischen Produkte der Spaltenvektoren  $\mathbf{f}_{:r}^{(n)} \in \mathbb{R}^{I_n}$  der Faktormatrizen  $\mathbf{F}^{(n)} \in \mathbb{R}^{I_n \times R}$  gegeben und mit den Faktoren  $\lambda_r$  des Vektors  $\boldsymbol{\lambda} \in \mathbb{R}^R$  gewichtet sind. Die elementweise Notation ist für Indizes  $i_n \in \{1, \dots, I_n\}$ ,  $n = 1, \dots, N$  definiert durch

$$e(i_1, i_2, \dots, i_N) \approx \sum_{r=1}^R \lambda_r \cdot f^{(1)}(i_1, r) \cdot f^{(2)}(i_2, r) \cdot \dots \cdot f^{(N)}(i_N, r). \quad (3.84)$$

Die in (3.83) und (3.84) auftretende Variable  $R$  wird als Rang der CP-Dekomposition bezeichnet. Von der Wahl des Dekompositions-rangs  $R$  hängt sowohl die Approximationsgenauigkeit als auch der Speicherbedarf der CP-Dekomposition ab. Umso größer der Rang der Dekomposition  $R$  gewählt wird, desto größer ist der Speicherbedarf und umso höher ist die Approximationsgüte. Da in die CP-Dekomposition in der Regel nur eine Näherung des ursprünglichen Tensors darstellt, spricht man auch von einer Rang- $R$ -Approximation. Da der Verhaltenstensor Wahrscheinlichkeiten enthält, die somit nur nichtnegative Werte annehmen können, erfolgt die Dekomposition des Verhaltenstensor ausschließlich mithilfe von Algorithmen die dies entsprechend berücksichtigen. Man spricht dabei auch von einer nicht-negativen CP Dekomposition. Für Programmiersprachen wie MATLAB<sup>®</sup> existieren verschiedene Werkzeuge, mit denen sich nichtnegative CP-Dekompositionen einfach realisieren lassen: [3], [37].

Die Abbildung 3.65 visualisiert das Prinzip der CP-Dekomposition.

**3.5.5.2 CP-Repräsentation stochastischer Automaten** Mithilfe der CP-Dekomposition nach Definition 3.12 kann der Verhaltenstensor (3.38) entsprechend dekomponiert werden. Dies gilt ebenso für den Verhaltenstensor des qualitativen Modells.

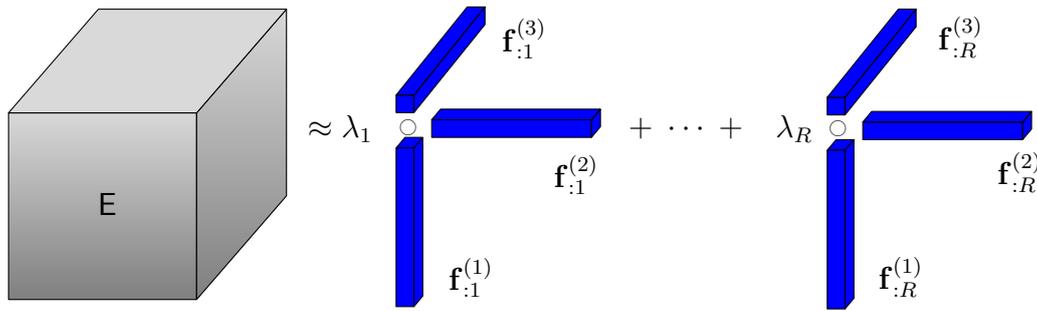


Abbildung 3.65: CP-Dekomposition eines Tensors dritter Ordnung, nach [18, S. 21]

**Definition 3.13** (Rang- $R$  Approximation des Verhaltenstensors [30]). Die Approximation des Verhaltenstensors  $L \in [0, 1]^{N \times Q \times N \times M}$  durch einen Tensor

$$\hat{L} \approx L, \quad (3.85)$$

mit der CP-Repräsentation

$$\hat{L} = \llbracket \lambda; \mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{C}, \mathbf{D} \rrbracket \equiv \sum_{r=1}^R \lambda_r \mathbf{a}_{:r} \circ \mathbf{b}_{:r} \circ \mathbf{c}_{:r} \circ \mathbf{d}_{:r} \in \mathbb{R}_{\geq 0}^{N \times Q \times N \times M} \quad (3.86)$$

und Faktormatrizen

$$\mathbf{A} \in \mathbb{R}_{\geq 0}^{N \times R}, \quad \mathbf{B} \in \mathbb{R}_{\geq 0}^{Q \times R}, \quad \mathbf{C} \in \mathbb{R}_{\geq 0}^{N \times R}, \quad \mathbf{D} \in \mathbb{R}_{\geq 0}^{M \times R}$$

sowie dem Gewichtungsvektor  $\lambda \in \mathbb{R}_{\geq 0}^R$ , wird als Rang- $R$  Approximation des Verhaltenstensors bezeichnet.

In Gleichung (3.86) steht  $\mathbf{A} \in \mathbb{R}_{\geq 0}^{N \times R}$  für die Faktormatrix der Folgezustände des Verhaltenstensors und  $\mathbf{B} \in \mathbb{R}_{\geq 0}^{Q \times R}$ ,  $\mathbf{C} \in \mathbb{R}_{\geq 0}^{N \times R}$  sowie  $\mathbf{D} \in \mathbb{R}_{\geq 0}^{M \times R}$  repräsentieren die Faktormatrizen der Ausgaben, Zustände und Eingaben. Dabei gilt es zu beachten, dass für den approximierten Verhaltenstensor  $\hat{L} \in \mathbb{R}_{\geq 0}^{N \times Q \times N \times M}$  gilt, womit die Werte der Elemente  $l(\bar{z}, w, z, v)$  nicht notwendigerweise innerhalb des Einheitsintervalls  $[0, 1]$  liegen.

**3.5.5.3 CP-Beobachtergleichung** Um den Beobachteralgorithmus für CP-dekomponierte Verhaltenstensen definieren zu können, müssen zunächst die Eingaben  $v(k)$  und Ausgaben  $w(k)$  des stochastischen Automaten in eine vektorielle Form überführt werden. Die vektoriellen Eingaben  $\mathbf{p}_v(k)$  und Ausgaben  $\mathbf{p}_w(k)$  besitzen dabei nur ein Einselement, sodass

$$\mathbf{p}_w(k) = \begin{pmatrix} \Pr(w(k) = 1) \\ \vdots \\ \Pr(w(k) = w) \\ \vdots \\ \Pr(w(k) = Q) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ \vdots \\ 1 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix} \in \{0, 1\}^Q, \quad \mathbf{p}_v(k) = \begin{pmatrix} \Pr(v(k) = 1) \\ \vdots \\ \Pr(v(k) = v) \\ \vdots \\ \Pr(v(k) = M) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ \vdots \\ 1 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix} \in \{0, 1\}^M \quad (3.87)$$

für alle Zeiten  $k = 0, 1, 2, \dots$  gilt. Die Wahrscheinlichkeit einer Eingabe  $v(k)$  und einer Ausgabe  $w(k)$  ist dabei stets eins, sodass die Vektoren nur an der  $v$ -ten und  $w$ -ten Position den Wert eins besitzen, während alle anderen Komponenten null sind. Damit kann die CP-Beobachtergleichung wie folgt definiert werden.

**Definition 3.14** (CP-Beobachtergleichung [31, S. 5625]). Die Beobachtergleichung für einen stochastische Automaten mit exakt CP-dekomponiertem Verhaltenstensor, ist definiert durch

$$\begin{aligned}
 & k \geq 0 : \\
 & \mathbf{p}_z(k+1) = \frac{\mathbf{A} \cdot \left( \boldsymbol{\lambda} \otimes \left( \mathbf{B}^\top \cdot \mathbf{p}_w(k) \right) \otimes \left( \mathbf{C}^\top \cdot \mathbf{p}_z(k) \right) \otimes \left( \mathbf{D}^\top \cdot \mathbf{p}_v(k) \right) \right)}{\left\| \mathbf{A} \cdot \left( \boldsymbol{\lambda} \otimes \left( \mathbf{B}^\top \cdot \mathbf{p}_w(k) \right) \otimes \left( \mathbf{C}^\top \cdot \mathbf{p}_z(k) \right) \otimes \left( \mathbf{D}^\top \cdot \mathbf{p}_v(k) \right) \right) \right\|_1} \in [0, 1]^N, \\
 & k = 0 : \\
 & \mathbf{p}_z(0) := \mathbf{p}_0 .
 \end{aligned} \tag{3.88}$$

Dabei ist  $\mathbf{p}_z(k) \in [0, 1]^N$ ,  $\mathbf{p}_w(k) \in \{0, 1\}^Q$  sowie  $\mathbf{p}_v(k) \in \{0, 1\}^M$ .

Ein Beweis der Gleichung (3.88) findet sich in [31].

Ist die CP-Dekomposition nicht exakt, was üblicherweise in der Praxis der Fall ist, dann wird die Gleichung (3.88) mit  $\hat{\mathbf{p}}_z(k+1)$  stets nur eine Approximation der Zustandswahrscheinlichkeitsverteilungen generieren.

**3.5.5.4 Qualitativer CP-Beobachteralgorithmus** Auf der Grundlage von Gleichung (3.88) kann nun der qualitative Beobachteralgorithmus für die CP-Repräsentation qualitativer Modelle definiert werden. Dabei gilt es zu beachten, dass der Verhaltenstensor  $\hat{\mathbf{L}}$  des qualitativen Modells als auch die Wahrscheinlichkeitsvektoren der qualitativen Zustände  $\hat{\mathbf{p}}_z(k)$  nur Näherungen darstellen, da reale Systeme die Markow-Eigenschaft im Allgemeinen nicht besitzen. Durch die in der Regel nicht exakte CP-Dekomposition des Verhaltenstensors des qualitativen Modells kommt eine weitere Approximation hinzu, weshalb der Verhaltenstensor durch das Symbol  $\hat{\mathbf{L}}$  gekennzeichnet wird. Das Symbol  $\hat{\cdot}$  kennzeichnet dabei auch alle weiteren Größen, die aufgrund der Dekomposition nur Näherungen der Ursprungsgrößen darstellen.

Der Ablauf des Algorithmus 3.2 zur Fehlerdetektion auf Grundlage CP-dekomponierter Verhaltenstensoren erfolgt dabei analog zur Beschreibung in Abschnitt 3.5.4.5.

### 3.5.6 Anwendungsbeispiele qualitativer Modelle zur Fehlerdetektion

In diesem Abschnitt wird die Fehlererkennung mit qualitativen Modellen exemplarisch anhand der Fehler  $F1$  und  $F2$  des HT-Kreises aus Tabelle 3.8 gezeigt. Die Beschreibung dieser Fehler findet sich im Abschnitt 3.4.6.

**3.5.6.1 fehlerhafte Sollwert-Temperatur für den BHKW-Vorlauf** Das qualitative Modell des HT-Kreises aus Abbildung 3.47 besitzt zwei Eingangsgrößen  $u_1, u_2$ , drei Zustandsgrößen  $x_1, x_2, x_3$  und zwei Ausgangsgrößen  $y_1, y_2$ , die durch die folgenden Signale definiert sind:

- $u_1$  : Vorlauftemperatur Kessel
- $u_2$  : Vorlauftemperatur Speicher primär

---

**Algorithmus 3.2:** CP-Algorithmus zur qualitativen Fehlerdetektion [30]

---

**Gegeben:** Qualitatives Modell  $\tilde{A}$ , Verhaltenstensor in CP-  
Repräsentation  $\hat{\tilde{L}} = \llbracket \lambda; \mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{C}, \mathbf{D} \rrbracket$   
Qualitative vektorielle Eingabefolge  $\tilde{\mathbf{P}}_v(0..T)$   
Qualitative vektorielle Ausgabefolge  $\tilde{\mathbf{P}}_w(0..T)$

**Initialisiere:**  $k = 0$ ,  $\tilde{\mathbf{p}}_z(0) := \tilde{\mathbf{p}}_0$

**Iteriere:**

- 1 **solange**  $0 \leq k \leq T$
- 2 *berechne*  $\mathbf{A} \cdot (\lambda \oplus (\mathbf{B}^\top \cdot \tilde{\mathbf{p}}_w(k)) \oplus (\mathbf{C}^\top \cdot \hat{\tilde{\mathbf{p}}}_z(k)) \oplus (\mathbf{D}^\top \cdot \tilde{\mathbf{p}}_v(k)))$ , Gl. (3.88)
- 3 *berechne*  $\|\mathbf{A} \cdot (\lambda \oplus (\mathbf{B}^\top \cdot \tilde{\mathbf{p}}_w(k)) \oplus (\mathbf{C}^\top \cdot \hat{\tilde{\mathbf{p}}}_z(k)) \oplus (\mathbf{D}^\top \cdot \tilde{\mathbf{p}}_v(k)))\|_1 =: \hat{b}(k)$ ,
- 4 *berechne*  $\hat{b}_m(k)$ , Gl. (3.78) und  $\hat{b}_b(k)$ , Gl. (3.80)
- 5 **wenn**  $\hat{b}(k) = 0$  **dann**
- 6     *setze*  $\hat{\tilde{\mathbf{p}}}_z(k+1) = \tilde{\mathbf{p}}_0$
- 7     *setze*  $k := k + 1$  und fahre fort mit Schritt 1
- 8 **sonst**
- 9     *berechne*  $\hat{\tilde{\mathbf{p}}}_z(k+1)$ , Gl. (3.88)
- 10    *setze*  $k := k + 1$  und fahre fort mit Schritt 1

**Ergebnis:** Folge  $\hat{\tilde{\mathbf{P}}}_z(0..T+1 | \tilde{\mathbf{P}}_v(0..T), \tilde{\mathbf{P}}_w(0..T))$ ,  
Folge  $\hat{\tilde{\mathbf{B}}}(0..T | \tilde{\mathbf{P}}_v(0..T), \tilde{\mathbf{P}}_w(0..T))$ ,  
Folge  $\hat{\tilde{\mathbf{B}}}_m(0..T)$   
Folge  $\hat{\tilde{\mathbf{B}}}_b(0..T)$

---

- $x_1$  : Speichertemperatur oben
- $x_2$  : Speichertemperatur mitte
- $x_3$  : Speichertemperatur unten
- $y_1$  : Rücklauftemperatur Kessel
- $y_2$  : Rücklauftemperatur Speicher primär

Für jede dieser Größen wurden vier qualitative Partitionen definiert, sodass die Anzahl qualitativer Eingaben  $M = M_1 \cdot M_2 = 4 \cdot 4 = 16$  beträgt. Für die Anzahl der qualitativen Ausgaben gilt  $Q = Q_1 \cdot Q_2 = 4 \cdot 4 = 16$  und für die qualitativen Zustände  $N = N_1 \cdot N_2 \cdot N_3 = 4 \cdot 4 \cdot 4 = 64$ . Nach Gleichung (3.82) ergibt sich damit ein Speicherbedarf von

$$\alpha = 16^2 \cdot 16 \cdot 16 = 1\,048\,576 \quad (3.89)$$

Werten. Die folgende Abbildung 3.66 zeigt die qualitativen Zustandstrajektorien für den Fehlerzeitbereich der auch in Abbildung 3.47 dargestellt ist. Die qualitativen Zustandstrajektorien basieren letztlich auf einer Visualisierung der vektoriellen Zustandswahrscheinlichkeitsfolgen (3.75). Die blauen Punkte innerhalb der Abbildungen stellen die Mess-, bzw. Simulationssignale dar. Die Grauschattierungen im Hintergrund repräsentieren die Zustandswahrscheinlichkeiten. Umso dunkler der Hintergrund dargestellt ist, desto höher wurde die Wahrscheinlichkeit bewertet, dass sich der jeweilige Messwert in diesem Bereich befindet.

Deutlich zu erkennen ist in den Abbildungen der fehlerhafte Bereich, in dem der Hintergrund weiß ist, da das qualitative Modelle für die inkonsistenten E/A Folgen keine

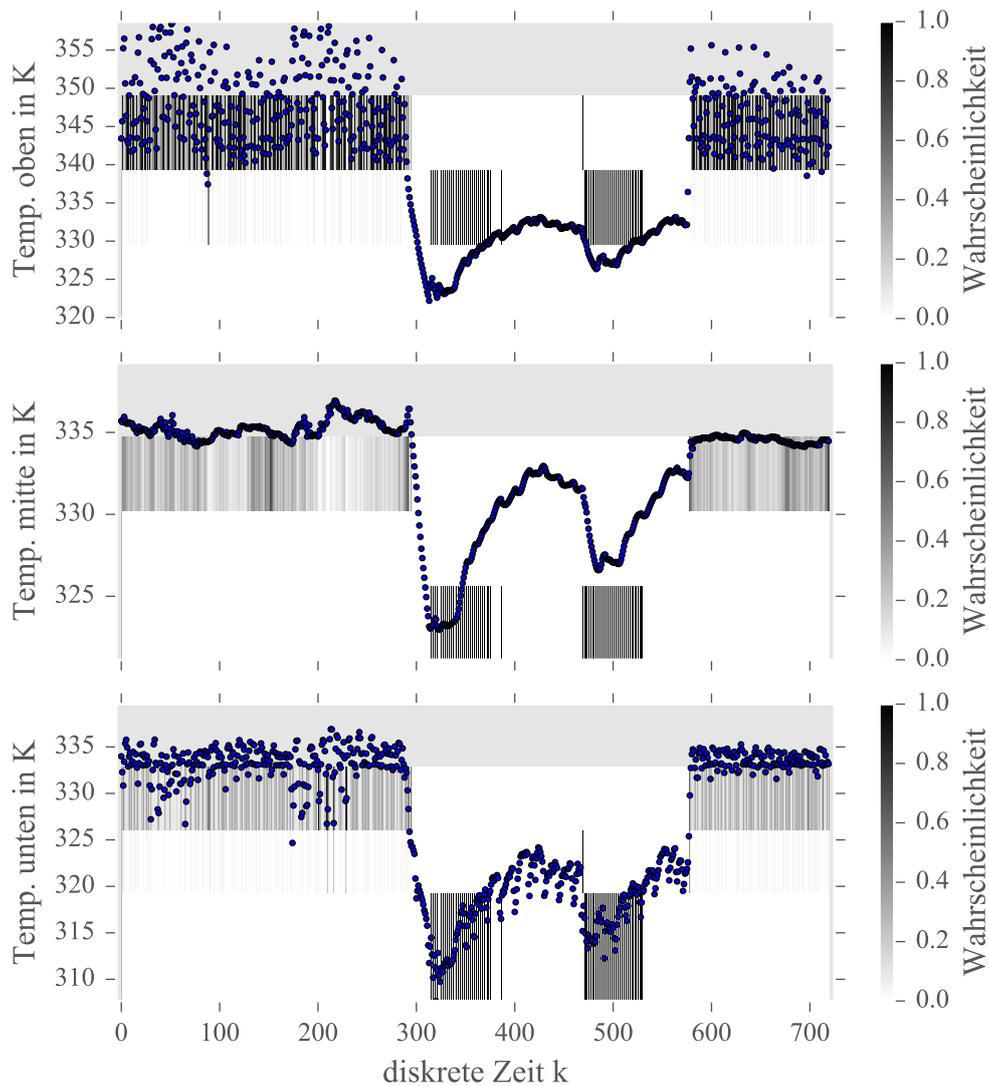


Abbildung 3.66: Qualitative Zustandstrajektorien für die Speichertemperaturen. Zeitbereich 27.01. - 01.02. Ein diskreter Zeitschritt  $k$  entspricht 10 min.

Zustandswahrscheinlichkeiten bestimmen kann. Die Abbildung 3.67 zeigt das Verhaltenssignal (3.81) für  $\tau = 0, \phi = 3\%$ . Dieses besitzt den Wert 1 im Nominalbetrieb und den Wert 0, wenn ein Fehler oder unplausibler Betriebszustand auftritt.

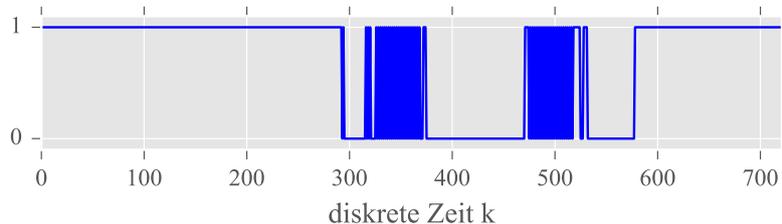


Abbildung 3.67: Verhaltenssignal  $\hat{B}_b$ , Gleichung (3.81)

Das Verhaltenssignal bietet somit eine sehr einfach und gut zu interpretierende Möglichkeit, das Systemverhalten hinsichtlich seines nominalen oder fehlerhaften Betriebs zu bewerten.

Der hier behandelte Fehler wurde insgesamt 3 mal innerhalb eines Zeitraumes von drei

Monaten simuliert. Die Abbildung 3.68 zeigt den gesamten Zeitbereich vom 05.01. – 01.03.

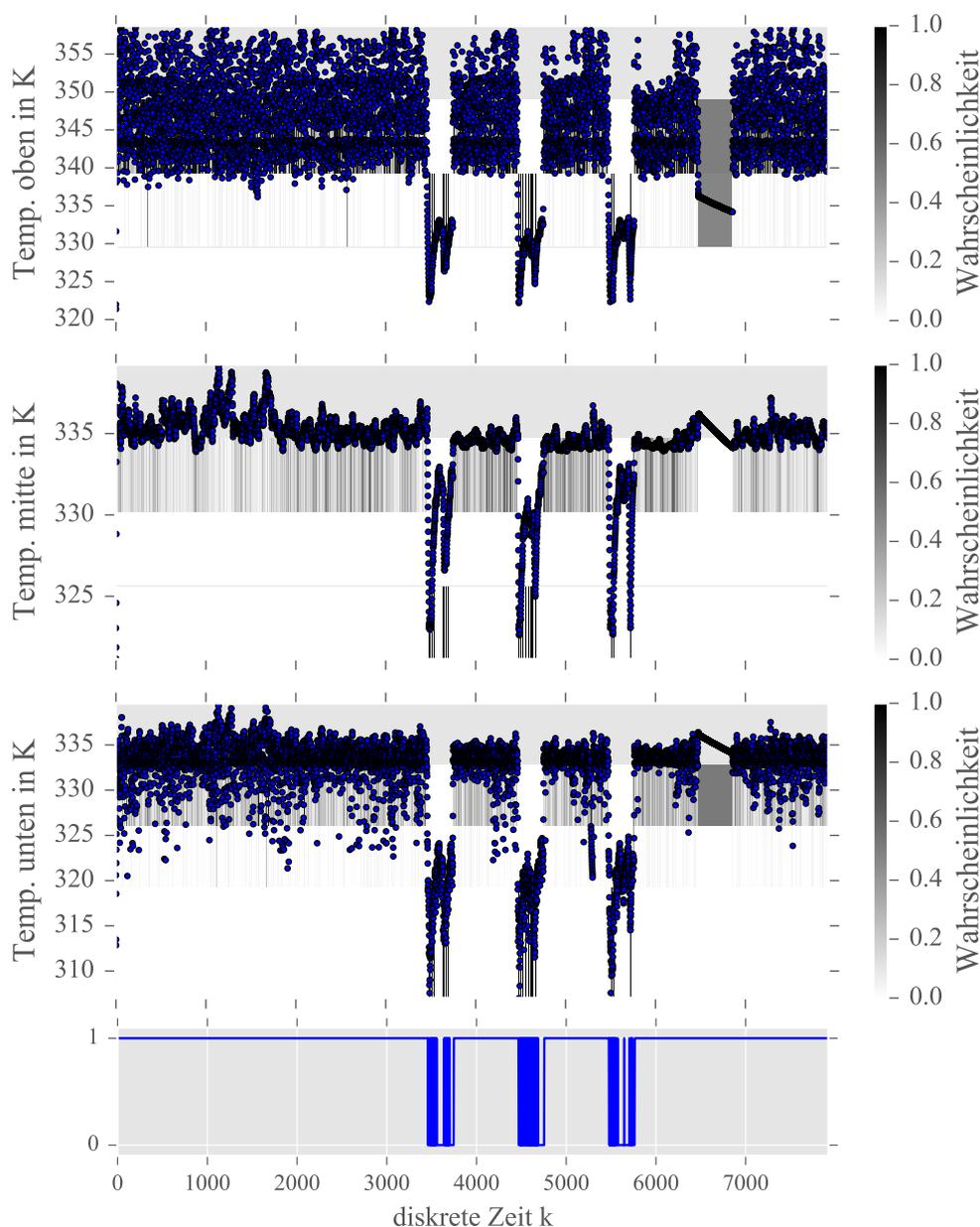


Abbildung 3.68: Qualitative Zustandstrajektorien für die Speichertemperaturen und Verhaltenssignal. Zeitbereich 05.01. – 01.03. Ein diskreter Zeitschritt  $k$  entspricht 10 *min*.

Die Abbildung 3.69 zeigt anhand der Verhaltenssignale die Ergebnisse eines CP-dekomponierten qualitativen Modells, für die Dekompositionsränge  $R = 10$ ,  $R = 20$  und  $R = 30$ . Während das nicht dekomponierte qualitative Modell, einen Speicherbedarf von 1 048 576 Werten besitzt, beträgt dieser für die CP-Dekomposition in Abhängigkeit des Dekompositionsrangs  $R$ , nur noch

$$\alpha_{CP} = R \cdot (N + Q + N + M) + R \quad (3.90)$$

Für beispielsweise die  $R=20$  Approximation des Verhaltenstensors des qualitativen Modells, müssen damit lediglich  $20 \cdot (16 + 16 + 16 + 16) + 20 = 1300$  Werte gespeichert

werden. Wie die Abbildung zeigt, liefern die Rang-20 und Rang-30 Approximationen sehr gute Ergebnisse. Die Approximationsgüte der Rang-10 Dekomposition ist hingegen zu gering um brauchbare Resultate zu generieren.

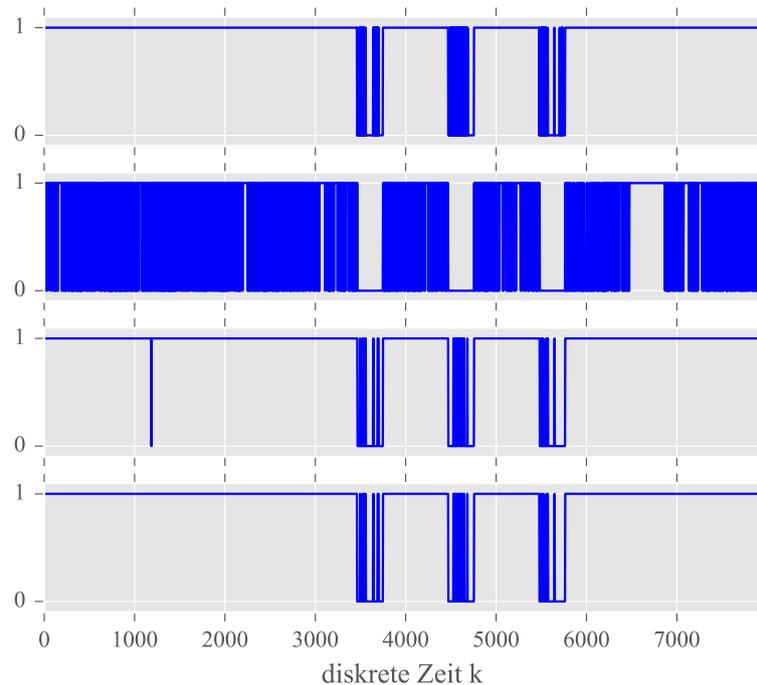


Abbildung 3.69: Verhaltenssignale ( $\tau = 1\%$ ,  $\phi = 3\%$ ). Von oben nach unten: Ohne Dekomposition,  $R$ -10,  $R$ -20,  $R$ -30 Approximation

Bei der Verwendung CP-dekomponierter Verhaltenstensoren, muss für die Erstellung des Verhaltenssignals der Grenzwert  $\tau$  (vgl. Abschnitt 3.5.4.5), in der Regel auf einen niedrigen Wert gesetzt werden. Dies ist notwendig, da die Dekomposition in der Praxis nur eine Näherung darstellt, was zur Folge hat, dass die ursprünglichen Nullelemente im Verhaltenstensor unter Umständen durch sehr kleine Werte approximiert werden. Dies hat wiederum zur Folge, dass der Nenner der Beobachtergleichung nicht mehr Null wird und Fehler nicht mehr detektiert werden können. Mit dem Grenzwert  $\tau$  kann die Schwelle, ab der kleine Werte des Verhaltenssignals als Fehler klassifiziert werden sollen, frei gewählt werden.

**3.5.6.2 Ausgefallener Wärmeerzeuger im BHKW-Kreis** Die Abbildung 3.70 zeigt die Detektion des Fehlers  $F2$  im HT-Kreis aus Tabelle 3.8. Auch dieser Fehler wurde innerhalb des Zeitraums 05.01. – 01.03 drei mal simuliert. Wie die Zustandstrajektorien der Speichertemperaturen und das Verhaltenssignal zeigen, konnte auch dieser Fehler erkannt werden.

### 3.5.7 Fazit

Wie auch die Veröffentlichungen [31], [32], [33] zeigen, können qualitative Modelle mithilfe von Tensordekompositionsmethoden erheblich reduziert werden, wobei die grundlegenden Modelleigenschaften und die Fähigkeit zur Fehlererkennung erhalten bleiben. Weitere Beispiele zur Fehlererkennung mit qualitativen Modellen in realen Systemen

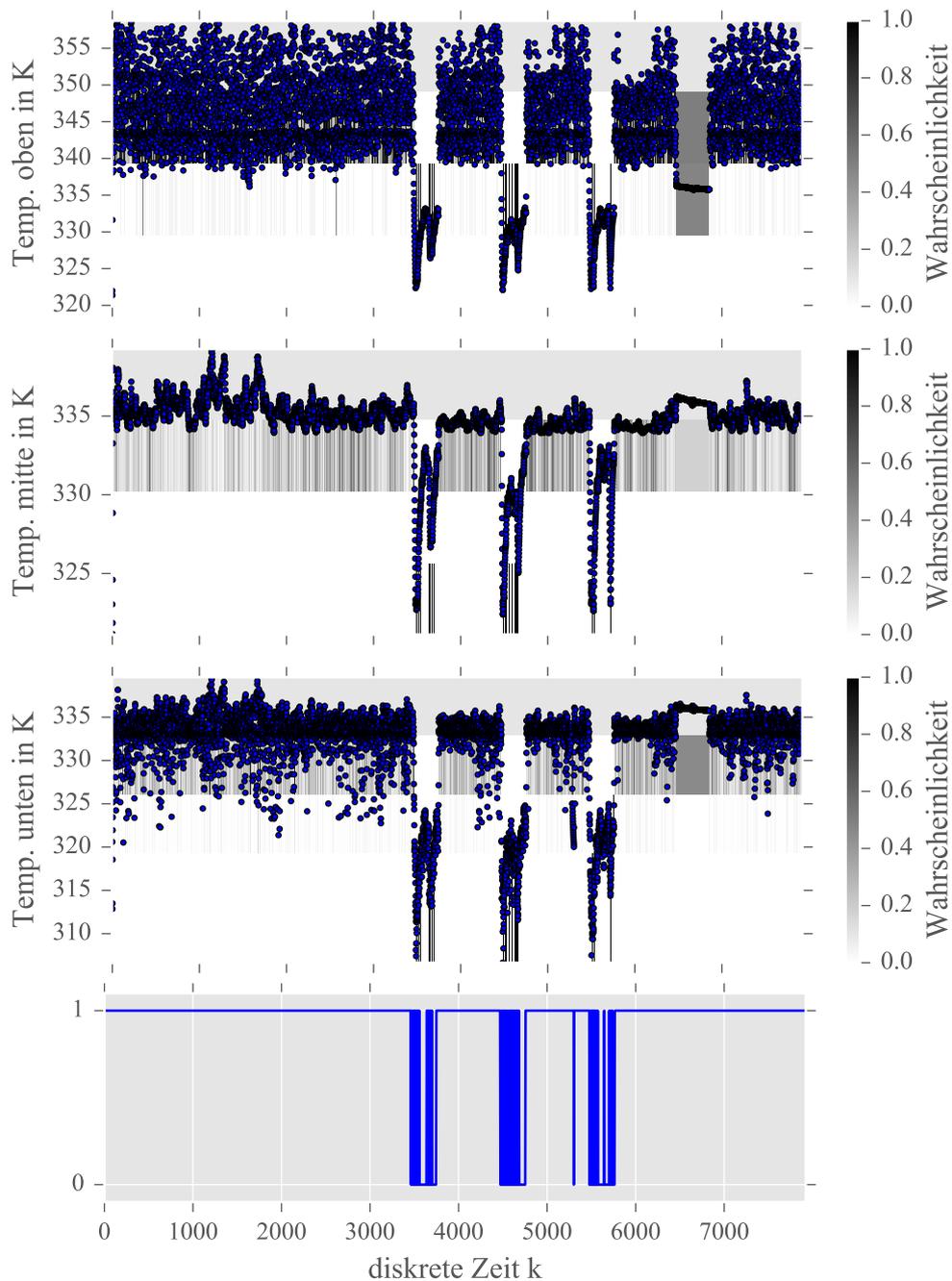


Abbildung 3.70: Qualitative Zustandstrajektorien für die Speichertemperaturen und Verhaltenssignal. Zeitbereich 05.01. – 01.03. Ein diskreter Zeitschritt  $k$  entspricht 10 min.

finden sich in AP A.5. Hier wurde ein qualitatives Modell für den Einsatz auf einem Mikrocomputer generiert und dem Projektpartner Kieback+Peter zur Verfügung gestellt.

Weiterer Forschungsbedarf im Bereich der qualitativen Modelle besteht in Bezug auf die Optimierungsalgorithmen der Tensordekomposition. Erstrebenswert wäre die Implementierung von Routinen, welche es ermöglichen, die Elemente der Faktormatrizen der Dekomposition unter stochastischen Randbedingungen zu berechnen. Zwar verhindert die Verwendung der nichtnegativen CP-Dekomposition, dass in der Approximation der Wahrscheinlichkeiten des Verhaltenstensors negative Werte auftreten können – es ist jedoch möglich, dass Werte größer eins vorkommen.

# Literatur

- [1] *10th International Modelica Conference* (2014).
- [2] Bader, B. W. und Kolda, T. G. (2008): „Efficient MATLAB Computations with Sparse and Factored Tensors“. In: *SIAM Journal on Scientific Computing* Bd. 30, Nr. 1, S. 205–231. ISSN: 1064-8275, 1095-7197. DOI: 10.1137/060676489.
- [3] Bader, B. W., Kolda, T. G. et al. (2015): *MATLAB Tensor Toolbox Version 2.6*. Verfügbar online. URL: <http://www.sandia.gov/~tgkolda/TensorToolbox/>.
- [4] Blanke, M., Kinnaert, M., Lunze, J. und Staroswiecki, M. (2006): *Diagnosis and Fault-Tolerant Control*. Second Edition. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag. ISBN: 978-3-540-35652-3.
- [5] Blanke, M., Kinnaert, M., Lunze, J. und Staroswiecki, M. (2016): *Diagnosis and Fault-Tolerant Control*. Third Edition. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag. ISBN: 978-3-662-47942-1.
- [6] Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (2014): *Handbuch: Testreferenzjahre von Deutschland für mittlere, extreme und zukünftige Witterungsverhältnisse*. Offenbach.
- [7] Cichocki, A., Mandic, D., Lathauwer, L. D., Zhou, G., Zhao, Q., Caiafa, C. und Phan, H. A. (2015): „Tensor Decompositions for Signal Processing Applications: From Two-Way to Multiway Component Analysis“. In: *IEEE Signal Processing Magazine* Bd. 32, Nr. 2, S. 145–163. ISSN: 1053-5888. DOI: 10.1109/MSP.2013.2297439.
- [8] Cichocki, A. (2018): „Tensor Networks for Dimensionality Reduction, Big Data and Deep Learning“. In: *Advances in Data Analysis with Computational Intelligence Methods*. Hrsg. von A. E. Gawęda, J. Kacprzyk, L. Rutkowski und G. G. Yen. Studies in Computational Intelligence 738. Cham: Springer International Publishing, S. 3–49. ISBN: 978-3-319-67945-7. DOI: 10.1007/978-3-319-67946-4\_1.
- [9] Cichocki, A., Zdunek, R., Phan, H. A. und Amari, S.-I. (2009): *Nonnegative Matrix and Tensor Factorizations: Applications to Exploratory Multi-Way Data Analysis and Blind Source Separation*. John Wiley & Sons, Ltd. ISBN: 978-0-470-74666-0.
- [10] DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (2008a): *DIN EN 15251*. Berlin.
- [11] DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (2008b): *DIN EN ISO 13790*. Berlin.
- [12] Gruber, P., Gwerder, M. und Tödtli, J. (2002): „Modellprädiktive Regelung für Heizungsanwendungen“. In: *SGA - ASSPA - SSAC BULLETIN*. Hrsg. von Schweizerische Gesellschaft für Automatik. Bd. 34. Bronschhofen.
- [13] Grundfos A/S (2013): *Grundfos Data Booklet: Magna, UPE: Series 2000 circulator pumps*. Bjerringbro und Dänemark.
- [14] Hackbusch, W. (2012): *Tensor Spaces and Numerical Tensor Calculus*. Bd. 42. Springer Series in Computational Mathematics. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag. ISBN: 978-3-642-28027-6. DOI: 10.1007/978-3-642-28027-6.

- [15] Kalz, D. E. (2010): *Heating and Cooling Concepts employing Environmental Energy and Thermo-Active Building Systems for Low-Energy Buildings: System Analysis and Optimization*. Stuttgart: Fraunhofer Verlag. ISBN: 3839601762.
- [16] Karra, S., Jelali, M., Karim, M. N. und Horch, A. (2010): „Detection of Oscillating Control Loops“. In: *Detection and Diagnosis of Stiction in Control Loops: State of the Art and Advanced Methods*. Hrsg. von M. Jelali und B. Huang. London: Springer London, S. 61–100. ISBN: 978-1-84882-775-2. DOI: 10.1007/978-1-84882-775-2\_4.
- [17] Kennedy, J. und Eberhart, R. (1995): „Particle swarm optimization“. In: *Proceedings of ICNN'95 - International Conference on Neural Networks*. Bd. 4, S. 1942–1948. DOI: 10.1109/ICNN.1995.488968.
- [18] Kolda, T. G. (2006): *Multilinear Operators for Higher-Order Decompositions*. Tech. Report SAND2006-2081. Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM, Livermore, CA, S. 1–28. URL: <http://www.sandia.gov/~tgkolda/pubs/pubfiles/SAND2006-2081.pdf>.
- [19] Kolda, T. G. und Bader, B. W. (2009): „Tensor Decompositions and Applications“. In: *SIAM Review* Bd. 51, Nr. 3, S. 455–500. ISSN: 0036-1445, 1095-7200. DOI: 10.1137/07070111X.
- [20] Lichtenberg, G. (1998): *Theorie und Anwendung der qualitativen Modellierung zeitdiskreter dynamischer Systeme durch nichtdeterministische Automaten*. Dissertation. Vortschrittberichte VDI, Reihe 8: Mess-, Steuerungs- und Regelungstechnik, Nr. 686. Düsseldorf: VDI Verlag GmbH. ISBN: 3-18-368608-2.
- [21] Lichtenberg, G. und Lunze, J. (1997): „Observation of Qualitative States by Means of a Qualitative Model“. In: *International Journal of Control* Bd. 66, Nr. 6, S. 885–903. DOI: 10.1080/002071797224441.
- [22] Linden, F. van der (2014): „General Fault Triggering Architecture to Trigger Model Faults in Modelica Using a Standardized Blockset“. In: *Proceedings of the 10th International Modelica Conference*. Lund, Sweden, S. 427–436. DOI: 10.3384/ecp14096427.
- [23] Lunze, J. (1994): „Qualitative Modelling of Linear Dynamical Systems with Quantized State Measurements“. In: *Automatica* Bd. 30, Nr. 3, S. 417–431. ISSN: 00051098. DOI: 10.1016/0005-1098(94)90119-8.
- [24] Lunze, J. (1998): „On the Markov Property of Quantised State Measurement Sequences“. In: *Automatica* Bd. 34, Nr. 11, S. 1439–1444. ISSN: 00051098. DOI: 10.1016/S0005-1098(98)00099-5.
- [25] Lunze, J., Nixdorf, B. und Schröder, J. (1999): „Deterministic Discrete-Event Representations of Linear Continuous-Variable Systems“. In: *Automatica* Bd. 35, Nr. 3, S. 395–406. ISSN: 00051098. DOI: 10.1016/s0005-1098(98)00176-9.
- [26] Lunze, J. und Schröder, J. (2001): „State Observation and Diagnosis of Discrete-Event Systems Described by Stochastic Automata“. In: *Discrete Event Dynamic Systems-Theory and Applications* Bd. 11, Nr. 4, S. 319–369. DOI: 10.1023/A:1011273108731.

- [27] Lunze, J. (2012): *Ereignisdiskrete Systeme: Modellierung und Analyse dynamischer Systeme mit Automaten, Markovketten und Petrinetzen*. 2. überarb. Aufl. München: Oldenbourg. ISBN: 978-3-486-71885-0.
- [28] Merk, J. (2015): „Modellierung, Kalibrierung und Betriebsoptimierung eines thermohydraulischen Gebäudeanlagensystems mit Modelica“. Masterarbeit. Universität Stuttgart.
- [29] Modelica Association (2015): *Modelica Standard Library: Free (standard conform) library from the Modelica Association*. URL: <https://github.com/modelica/Modelica> (besucht am 11.09.2015).
- [30] Müller-Eping, T. (2019): „Tensordekomposition qualitativer Modelle zur Fehlererkennung – Anwendung in der Gebäudeautomation“. Unveröffentlichte Dissertation, eingereicht am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) am 04.02.2019.
- [31] Müller-Eping, T., Lichtenberg, G. und Vogelmann, V. (2017): „Fault Detection Algorithms Based on Decomposed Tensor Representations for Qualitative Models“. In: *IFAC-PapersOnLine* Bd. 50, Nr. 1: *20th IFAC World Congress, Toulouse*, S. 5622–5629. DOI: 10.1016/j.ifacol.2017.08.1109.
- [32] Müller, T., Kruppa, K., Lichtenberg, G. und Réhault, N. (2015): „Fault Detection with Qualitative Models Reduced by Tensor Decomposition Methods“. In: *IFAC-PapersOnLine* Bd. 48, Nr. 21: *9th IFAC Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Processes (SAFEPROCESS 2015), Paris*, S. 416–421. DOI: 10.1016/j.ifacol.2015.09.562.
- [33] Müller, T. und Lichtenberg, G. (2016): „Fault Detection with CP-Decomposed Qualitative Models“. In: *IFAC-PapersOnLine* Bd. 49, Nr. 5: *4th IFAC Conference on Intelligent Control and Automation Sciences (ICONS 2016), Reims*, S. 309–314. DOI: 10.1016/j.ifacol.2016.07.131.
- [34] Réhault, N. und Ohr, F. (2015): *Observe Projekttreffen: Präsentationsfolien*.
- [35] Schmelas, M., Feldmann, T. und Bollin, E. (2015): „Adaptive predictive control of thermo-active building systems (TABS) based on a multiple regression algorithm“. In: *Energy and Buildings* Bd. 103, S. 14–28. ISSN: 03787788.
- [36] Schröder, J. (2003): *Modelling, State Observation and Diagnosis of Quantised Systems*. Lecture Notes in Control and Information Sciences 282. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag. ISBN: 978-3-540-46086-2.
- [37] Vervliet, N., Debals, O., Sorber, L., Van Barel, M. und De Lathauwer, L. (2016): *Tensorlab 3.0*. Verfügbar online. URL: <http://www.tensorlab.net>.
- [38] Wetter, M. (2015): *Modelica Library for Building Energy and Control Systems*. URL: <https://simulationresearch.lbl.gov/modelica> (besucht am 11.09.2015).
- [39] Wystrcil, D. und Kalz, D. (2012): „Thermo-hydraulische Modellierung eines Niedrigexergiesystems zur Gebäudeheizung- und Kühlung und exergetische Bewertung von Regelungsstrategien“. In: *Fourth German-Austrian IBPSA Conference*, S. 416–422.