

OBSERVE

Arbeitspaket B.3 Fehleranalyse

Förderkennzeichen: 03ET1225C

Erik Sewe
erik.sewe@plenuming.de

Plenum Ingenieurgesellschaft
für Planung Energie Umwelt m.b.H.
Rantzaustraße 32
22041 Hamburg
Tel. 040 687664

24. April 2018

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

PLENUM

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	2
Tabellenverzeichnis	5
5.1 Problemstellung	7
5.1.1 Gliederung	7
5.1.2 Stand in Wissenschaft und Technik	8
5.2 Fehler in komplexen Heizungsanlagen	12
5.3 Grundlagen der Fehlererkennung	20
5.3.1 Methoden der Fehlererkennung	24
5.3.2 Modellbildung	32
5.3.3 Tensoren und Tensorzerlegung	37
5.4 Datenkontrolle und manuelle Fehlererkennung	42
5.4.1 Raster der Datenerfassung	42
5.4.2 Datenbereitstellung / -abruf, Vorbereitung der Daten	47
5.4.3 Fehlererkennung mit Expertenwissen	49
5.5 Anwendungsbeispiele signalgestützter Methoden	53
5.5.1 Regelbasierte Fehlererkennung	53
5.5.2 Bestimmung von Betriebs- und Nutzungszeiten	63
5.5.3 Bestimmung von Kennwerten	66
5.5.4 Überprüfung der Raumtemperatur	70
5.5.5 Fehlererkennung mit Faktormatrizen aus Tensorzerlegung	71
5.5.6 Erkennung von Rauschen mit Frequenzanalyse	84
5.6 Anwendungsbeispiele modellbasierter Methoden	87
5.6.1 Fehlererkennung mit multi-linearen Modellen	87
5.6.2 Fehlererkennung mit Verbrauchermodellen	96
5.6.3 Überprüfung der Systemzeit	109
5.7 Mustererkennung in Raumtemperaturdaten - Detektion offener Fenster (IngSoft)	112
5.8 Fazit und Ausblick	113
Anhang	123
A Fehlerdatenbank	123
B Fehlerliste	126

Abbildungsverzeichnis

5.2-1	Fehlerhäufigkeit nach Fehlerkategorie	14
5.2-2	Fehlerhäufigkeit nach Bereichen	16
5.2-3	Fehlerhäufigkeit nach Teilsystemen bzw. Komponenten	16
5.2-4	Fehlerhäufigkeit nach Ursache	17
5.2-5	Fehlerhäufigkeit nach Auswirkung	17
5.2-6	Fehlerhäufigkeit nach Übertragbarkeit	18
5.2-7	Fehlerhäufigkeit nach Hinweis	19
5.3-1	Einordnung der Fehlererkennung	20
5.3-2	Geschlossener Regelkreis	21
5.3-3	Fehler in einer Regel- oder Steuerstrecke	22
5.3-4	Fehler	22
5.3-5	Residuen	24
5.3-6	Methoden der Fehlererkennung	26
5.3-7	Methoden der Fehlererkennung	27
5.3-8	Prinzip der Parameterschätzung	29
5.3-9	Fehlererkennung bei Hardwareredundanz	29
5.3-10	Paritätsgleichung	30
5.3-11	Diagnosesystem	31
5.3-12	Strukturen für Prozessmodelle	32
5.3-13	Schema Gaskessel	34
5.3-14	Vereinfachtes Gebäudemodell	35
5.3-15	Lineares, zeitdiskretes Zustandsraummodell	36
5.3-16	Tensor dritter Ordnung	37
5.3-17	CP Tensorzerlegung	38
5.4-1	Schrittweite bei ereignisbasierter Datenerfassung - Raumtemperatur	43
5.4-2	Rohdaten komprimiert zu Minutenraster, Detailansicht	44
5.4-3	Vergleich Rohdaten mit Minutenwerten	44
5.4-4	Genauigkeit und ereignisbasierte Datenerfassung - Differenzdruck	45
5.4-5	Vergleich von Minutenraster zu 5-Minutenraster	46
5.4-6	Sensorfehler	48
5.4-7	fehlerhafte Kalibrierung / Abgleich	48
5.4-8	Beispiel für Zeitreihenplots	49
5.4-9	Beispiel für Streudiagramme	50
5.4-10	Beispiele für Rasterdiagramme	51
5.5-1	Stromzähler Fahrstuhl, Leistungssignal	63
5.5-2	Nutzungszeiten Fahrstuhl, bestimmt über Stromverbrauch	64
5.5-3	Nutzungszeiten RLT, bestimmt über Stromzähler	65
5.5-4	Nutzungszeiten RLT, Fehlererkennung	65
5.5-5	Fehlererkennung: Nutzungszeiten	66
5.5-6	Grädigkeit eines Wärmeübertragers	67
5.5-7	Einhaltung der Heizkurve	68

5.5-8	Verknüpfung von Heizkurve und Außentemperatur	68
5.5-9	Laufzeiten BHKW: Fehlerhafte Einschaltbedingung	69
5.5-10	Laufzeiten BHKW: Fehlerfrei	69
5.5-11	Einhaltung der Komfortgrenzen gemäß DIN EN 15251	70
5.5-12	Wärmeverbrauch mit und ohne Absenkbetrieb	71
5.5-13	Leistungssignal, original und nach Approximation mit Rang 2	72
5.5-14	Leistungssignal, original und nach Approximation mit Rang 3	73
5.5-15	Tensorfaktoren, Rang 1	73
5.5-16	Tensorfaktoren, Rang 2	74
5.5-17	Tensorfaktoren, Rang 3	74
5.5-18	Leistungssignal, Rasterdiagramm	75
5.5-19	Pumpenbetrieb Warmwasserbereiter	76
5.5-20	Tensorfaktoren für ordnungsgemäßen Betrieb	76
5.5-21	Pumpenbetrieb Warmwasserbereiter mit Fehler	77
5.5-22	Tensorfaktoren für Betrieb mit Fehler	77
5.5-23	Tensorfaktoren für Heizkreis mit Absenkbetrieb, Rang 3	78
5.5-24	Tensorfaktoren für Heizkreis ohne Absenkbetrieb, Rang 3	78
5.5-25	Vergleich von erwarteten zu gemessenen Leistungswerten	80
5.5-26	Abweichung der gemessenen und erwarteten Leistungswerte	81
5.5-27	Fehlererkennung	81
5.5-28	Fehlerhafte Nachrüstung einer Lüftungsanlage	82
5.5-29	Fehlererkennung: RLT hydraulisch falsch eingebundenen	82
5.5-30	Wärmeleistung im Verhältnis zum Volumenstrom	83
5.5-31	Raumtemperatur mit Rauschen	85
5.5-32	Raumtemperatur ohne Rauschen	85
5.5-33	Cepstrum für Signal mit Rauschen	86
5.5-34	Cepstrum für Signale ohne Rauschen	86
5.6-1	Quantisierung und Begriffsdefinition	87
5.6-2	Quantisierung von Ein- und Ausgangsgrößen	88
5.6-3	Unvollständiger Parametertensor	90
5.6-4	Erzeugen des Parametertensors	91
5.6-5	Fehlererkennung	92
5.6-6	Schema der Mehrkesselanlage	92
5.6-7	Fehlererkennung Kessel 2, Validierung des Modells	94
5.6-8	Fehlererkennung Kessel 2, Handeingriff	94
5.6-9	Fehlererkennung Kessel 2, Fehler in der Leistungssteuerung	95
5.6-10	Beispiele für defekte Heizkörperstellantriebe	97
5.6-11	Durchflussskennlinie	97
5.6-12	Simulationsergebnis: Raumtemperaturen	98
5.6-13	Simulationsergebnis Fehlerfall: Raumtemperaturen	99
5.6-14	Simulationsergebnis: Volumenstrom	100
5.6-15	Simulationsergebnis Fehlerfall: Volumenstrom	100
5.6-16	Planskizze Kreuzbau	101
5.6-17	Gemessene und Simulierte Raumtemperatur - November 2013	104
5.6-18	R. 15: Simulation Raumtemperatur, ohne Fehler	105
5.6-19	R. 11: Simulation Raumtemperatur, mit Fehler	106
5.6-20	Simulierte Wärmeleistung - November 2013	108
5.6-21	Vergleich berechneter Sonnenaufgang / -untergang zur Globalstrahlung	109
5.6-22	Vergleich Sonnenaufgang / -untergang zu Leistungsprofil, mit Fehler	110

5.6-23	Vergleich Sonnenaufgang / -untergang zu Leistungsprofil, ohne Fehler	110
5.6-24	Verlauf der Außentemperatur	111

Tabellenverzeichnis

5.2-1	Fehlerkategorien	13
5.2-2	Bereichseinteilung	15
5.4-1	Datenstruktur - ereignisbasiert	42
5.4-2	Datenstruktur - zeitbasiert	42
5.4-3	Fehlerliste für Dateneingangskontrolle	47
5.4-4	Fehlerliste für Dateneingangskontrolle	49
5.5-1	Fehlerliste für Regel 1 - <i>Nutzungszeiten</i>	54
5.5-2	Fehlerliste für Regel 2 - <i>Sommerabschaltung und Frostschutz</i>	55
5.5-3	Fehlerliste für Regel 3 - <i>Schalzhäufigkeit</i>	55
5.5-4	Fehlerliste für Regel 4 - <i>Mindestlaufzeiten / Mindestausschaltzeiten</i>	56
5.5-5	Fehlerliste für Regel 5 - <i>Pumpenwechsel bei Doppelpumpen</i>	57
5.5-6	Fehlerliste für Regel 6 - <i>Anti-Blockierschaltungen</i>	57
5.5-7	Fehlerliste für Regel 7 - <i>Überprüfung von Abhängigkeiten</i>	57
5.5-8	Fehlerliste für Regel 8 - <i>Druck / Differenzdruck</i>	58
5.5-9	Fehlerliste für Regel 9 - <i>Legionellenvorsorge</i>	59
5.5-10	Fehlerliste für Regel 10 - <i>Auskühlung Zirkulation Warmwasser</i>	59
5.5-11	Fehlerliste für Regel 11 - <i>Einhaltung von Heiz- und Kühlkurven</i>	59
5.5-12	Fehlerliste für Regel 12 - <i>Temperaturspreizung bei Heizkreisen</i>	60
5.5-13	Fehlerliste für Regel 13 - <i>Rücklauftemperatur in Abhängigkeit von T_A</i>	61
5.5-14	Fehlerliste für Regel 14 - <i>Temperaturspreizung bei Wärmeerzeugern</i>	61
5.5-15	Fehlerliste für Regel 15 - <i>Vergleich von Rücklauftemperaturen</i>	62
5.5-16	Fehlerliste für Regel 16 - <i>Raumtemperatur</i>	62
5.5-17	Fehlerliste für Regel 17 - <i>Alterung Wärmeübertrager</i>	63
5.5-18	Nutzungswahrscheinlichkeiten	64
5.5-19	Fehlerliste für Prüfung mit Tensorfaktoren	84
5.6-1	Fehlerliste für die Erkennung mit multi-linearen Modellen	96
5.6-2	Bestandsaufnahme Klassenräume Kreuzbau	102
5.6-3	Grundparameter für das 3-Zonen-Modell	103
5.6-4	Parameter für maximalen variablen Volumenstrom	106
5.6-5	Fehlerliste für Prüfung mit Verbrauchermodell	107
5.6-6	Fehlerliste für Prüfung mit Sonnenstandsmodell	111
5.8-1	Zuordnung von Fehlerkategorien und Kategorien	116
B-2	Fehler der Kategorie <i>Nutzungszeiten</i>	126
B-3	Fehler der Kategorie <i>Abstimmung Komponenten</i>	127
B-4	Fehler der Kategorie <i>Hydraulischer Abgleich</i>	128
B-5	Fehler der Kategorie <i>Komponenten(-teil-)defekt</i>	130
B-6	Fehler der Kategorie <i>Schwingende Regelkreise</i>	131
B-7	Fehler der Kategorie <i>Einstellung lokaler Komponenten</i>	131
B-8	Fehler der Kategorie <i>Zugestellte Verbraucher</i>	132
B-9	Fehler der Kategorie <i>Planung / Ausführung</i>	133
B-10	Fehler der Kategorie <i>Daten</i>	134

Der vorliegende Bericht entspricht in großen Teilen der Dissertation *Automatisierte Fehlererkennung in Heizungsanlagen* welche von Erik Sewe im im Zuge des Forschungsprojekts *Optimierung und Betriebsführung komplexer Gebäudeenergieversorgungsanlagen* (OBSERVE) erarbeitet wurde.

5.1 Problemstellung

In dem Umfeld des energieoptimierten Gebäudebetriebes besteht der Bedarf für eine verbesserte Analyse von Heizungsanlagen, die schneller und kostengünstiger als bisher Fehler und Optimierungspotentiale aufdeckt. Die möglichen positiven Effekte einer automatisierten Fehlererkennung sind Kostensenkungen bei Wartung und Reparatur durch gezieltere Maßnahmen [30], Energiekosten können gesenkt, Komfortverletzungen vermieden sowie die Versorgungssicherheit erhöht werden. Die Arbeitskraft kann effizienter genutzt werden, da eine Hilfestellung erfolgt, wo Fehler sind und welche Potentiale mit ihrer Beseitigung verbunden sind. Zusätzlich muss weniger Information verarbeitet werden.

Um mögliche Einsparpotentiale und Ursachen von Fehlverhalten zu identifizieren werden Betriebsdaten benötigt. Die manuelle Analyse der Betriebsabläufe mit Hilfe dieser Daten ist zeitaufwendig und erfordert ein hohes Fachwissen. Eine besondere Herausforderung ist die Analyse von Wechselwirkungen zwischen Teilsystemen einer Heizungsanlage und von dynamischen Vorgängen. In komplexen Heizungsanlagen stößt eine manuelle Aufbereitung schnell an die Grenzen des Machbaren. Automatisierte Routinen zur Betriebsdatenanalyse können diesen Ablauf erleichtern indem sie in der Vielzahl von Information fehlerhafte Betriebszustände identifizieren.

Das Ziel dieses Arbeitspaketes war es, Methoden zu entwickeln, die bei der Betriebsüberwachung von Heizungsanlagen dem Anwender helfen, einen fehlerhaften Betrieb seiner Anlage zu erkennen. Der Nutzer soll auf fehlerhaften Betrieb aufmerksam gemacht werden, damit er weitere Maßnahmen zur Fehleridentifikation und -behebung auslösen kann.

Neben der Erarbeitung der theoretischen Grundlagen der Fehlererkennung wurde der Betrieb von Heizungsanlagen analysiert. Die identifizierten Fehler wurden in einer Datenbank abgelegt. Bei der Beurteilung und Einordnung der Fehler ist zu bedenken, dass es sich um Bestandsgebäude handelt, die schon länger in Betrieb sind und nicht um Neubauten. Mit Hilfe dieser Datenbank wurde bestimmt, welche Fehler häufig vorkommen und große Auswirkung haben. Aus den aus der Literatur erarbeiteten Methoden der Fehlererkennung wurden anschließend für diese Fehler passende Ansätze ausgewählt, angepasst und auf reale Messdaten angewandt. Hierbei wurde auch betrachtet, zu welchen Zeitpunkten und auf welcher Plattform (d.h. Position, Schnittstellen, Einbindung und Art des Computers) die Überwachung stattfinden kann.

5.1.1 Gliederung

In Kapitel 5.2 wird der Aufbau einer Fehlerdatenbank sowie deren Auswertung beschrieben. In ihr sind die im Gebäudebetrieb erkannten und identifizierten Fehler gespeichert. Das Ergebnis der Auswertung ist eine Liste mit Fehlern, welche die Basis für die Anwendung von Methoden zur Fehlererkennung sind. Sie ist im Anhang B angefügt. In Kapitel 5.3 werden die Grundlagen zur Fehlererkennung beschrieben. Hindernisse bei der und Anforderungen an die Fehlererkennung werden beschrieben und relevante Produkte und Dienstleistungen genannt. Es werden Methoden zur Modellbildung beschrieben sowie für die Anwendung benötigte mathematische Methoden eingeführt. Die Anwendung der Methoden auf reale Messdaten von verschiedenen Heizungsanlagen wird in den Kapiteln 5.4 bis 5.6 behandelt. Dabei umfasst Kapitel 5.4 Aspekte der Datenerfassung und -bereitstellung sowie die manuelle Prüfung mit Ex-

pertenwissen. Kapitel 5.5 beschreibt die Anwendung von signalgestützten Methoden mit dem Schwerpunkt auf einer regelbasierter Erkennung. In Kapitel 5.6 werden die Anwendung von modellbasierten Methoden beschrieben, wobei die Grey-Box Modellierung und ein Ansatz mit Multi-Linearen Modellen den Kern des Kapitels bilden.

Kapitel 5.7 wurde vom Projektpartner IngSoft bearbeitet. In ihm wird die Detektion von geöffneten Fenstern beschrieben.

Das Arbeitspaket schließt mit einer Zusammenfassung und einem Ausblick in Kapitel 5.8. In diesem werden auch die Betriebserfahrungen der unterschiedlichen Ansätze aus den Kapiteln 5.4 bis 5.6 betrachtet.

5.1.2 Stand in Wissenschaft und Technik

Erst Mitte der 90er Jahre fand die automatisierten Fehlererkennung Einzug in den Gebäudebereich [4] , lange nach anderen Branchen wie Luftfahrt oder Automobilbau. Grund ist, dass im Gebäudebereich das Kosten-/Nutzenverhältnis und nicht der Sicherheitsaspekt der treibende Faktor ist. Dabei ist das Verhältnis von Kosten und Nutzen nicht als reine Energiekosten zu verstehen, sondern auch durch mangelhafte Versorgung ausgelöste weitere Kosten wie Miet- oder Produktionsausfall und durch Verschleiss erhöhte Wartungskosten. Häufig sind diese wichtiger und höher als die Kostensenkung durch Energieeinsparung [46] . Bis heute werden die technischen Möglichkeiten kaum genutzt [19] , wie z.B. die automatische Codegenerierung für den Reglerentwurf die unter anderem im Automobilbau angewandt wird. Aktuell werden die meisten Fehler über Nutzerrückmeldungen oder Meldungen aus der Gebäudeautomation erkannt [3] . Das technische Personal reagiert oft unpassend aufgrund mangelndem Verständnisses der Anlagen, verursacht durch deren Komplexität. Eine Wartung wird häufig nur bei Störmeldungen durchgeführt und hat zum Ziel, die Anlage möglichst schnell wieder zum laufen zu bringen. Der potentielle Nutzen von automatisierter Fehlererkennung ist den meisten Gebäudebesitzern noch nicht bewusst, die technischen Möglichkeiten sind noch nicht ausreichend bekannt und genutzt.

Für die Analyse und Betriebsführung gibt es einen Zusammenhang von Kosten und Nutzen in Abhängigkeit vom Detailgrad der Datenerfassung [38] . Die beiden Extreme sind dabei auf der einen Seite die Verfügbarkeit der Daten nur für die Endenergie, die für die Heizung verwendet wird (*Top-Down* Ansatz). Auf der anderen Seite steht der *Bottom-Up* Ansatz, bei dem alle entscheidenden Störgrößen und Signale von Komponenten erfasst werden. Im Top-Down Ansatz wird die wenige bekannte Information auf Abweichung vom erwarteten Verbrauch geprüft und bei Auffälligkeiten nach der Ursache gesucht in dem die Anlage weiter im Detail betrachtet wird. Bei dem Bottom-Up Ansatz werden die Detailfunktionen geprüft und bei Fehlern deren Auswirkungen auf das Gesamtsystem bestimmt. Ausgehend vom Top-Down Ansatz steigt der Nutzen weiterer Messpunkte im Verhältnis zu den Kosten für deren Erfassung und Verwendung. Im weiteren Verlauf steigen die Kosten für weitere Messtechnik und der relative Nutzen sinkt, bis die Kosten schließlich den Nutzen übersteigen. Es ist verhältnismäßig einfach und kostengünstig die für die Gebäudeautomation verwendeten Signale zu erfassen, teurer und aufwändiger ist es zusätzliche Messtechnik zu installieren. Somit ist ein Ansatz, bei dem die wichtigsten Komponenten und Einflüsse erfasst werden ohne jedes Detail auszuwerten am ökonomischsten. Bei Bedarf kann die Datengrundlage durch Nachrüstungen oder mobile Messungen verbessert werden.

In ihrer Untersuchung beschäftigten sich Katipamula und Brambley [23] mit Fehlerer-

kennung und -diagnose im Gebäudebereich. Sie betrachten Kühlgeräte, Klimaanlage und Lüftungsanlagen, welche nach Angabe der Autoren den Hauptanteil der damaligen Forschung ausmachten. Zehn Jahre später bestätigen Brambley et al. [3] in ihrem Bericht diesen Fokus und unterstreichen die Notwendigkeit, die automatisierte Fehlererkennung und -diagnose auch auf weitere Bereiche der Gebäudetechnik auszuweiten. Dabei sollen die entwickelten Werkzeuge möglichst mit den für die Regelung notwendigen Sensoren arbeiten um die Hardwarekosten niedrig zu halten und sowohl für Einregulierung als auch für die kontinuierliche Betriebsüberwachung nutzbar sein. Als Empfehlungen für zukünftige Forschung nennen die Autoren unter anderem Praxistests, Kosten-/Nutzenbetrachtungen und die Definition von Standards. Die aktuelle Forschung für automatisierte Fehlererkennung und -diagnose im Gebäudebetrieb, basierend auf der Übersicht von Kim und Katipamula [25] - welche auf der vorher genannten Studie von Katipamula und Brambley [23] aufbaut - befasst sich weiterhin zu großen Anteilen mit einigen wenigen Komponentenarten und Teilsystemen. Bei 77% der Veröffentlichungen zur Methodenentwicklung werden Lüftungsanlagen, Komponenten von Lüftungsanlagen, Klimaanlage oder Wärmepumpen betrachtet. 12% befassen sich mit der Performanz des gesamten Gebäudes, 4% mit Warmwasserbereitern und jeweils 3% mit kommerziellen Kühlgeräten oder Beleuchtung. Nur 2% befassen sich mit den verbleibenden Teilsystemen. In 28 der 197 betrachteten Veröffentlichungen wurden die Auswirkungen auf Kosten und Energieverbrauch berücksichtigt, wenige Studien betrachten den Aspekt, dass es kontinuierlicher Überwachung bedarf, um die Performanz eines Gebäudes zu erhalten. Die Autoren empfehlen Forschung zu verbesserten Methoden, bei denen keine manuelle Modellidentifikation notwendig ist und die besser adaptierbar auf Änderungen der Konfiguration sind.

Die Internationale Energieagentur (International Energy Agency - IEA) forscht und entwickelt in ihrem Programm *Energy in Buildings and Community (EBC)*¹ an Lösungsansätzen zur Energieeinsparung und Reduzierung der Kohlenstoff-Emissionen im Gebäudebereich sowie deren Umsetzung. Die Ergebnisse werden auch für die Arbeit an Normen verwendet. Die Verbundprojekte, genannt Annex, zu verschiedenen Themengebieten dauern typischerweise drei bis vier Jahre. Im Annex 25 *Real Time HVAC Simulation* (1991-1995) [15, 30] werden häufigste Fehler in haustechnischen Systemen herausgearbeitet und Methoden der Fehlererkennung vorgestellt. Es werden einfache Modelle - häufig statische Modelle - von verschiedenen Komponenten und Systemen (Öl-Kessel, Kältemaschinen, Wärmepumpen, Lüftungssysteme und Speicher) vorgestellt. Fallstudien fanden nicht statt.

Annex 34 *Computer Aided Evaluation of HVAC System Performance* (1997-2001) [21] ist das Folgeprojekt zum Annex 25. An realen Gebäudedaten werden 26 Werkzeuge zur Fehlerdiagnose auf Komponenten- und Gebäudeebene getestet. Die wichtigsten Ergebnisse sind, dass die Fehlerdiagnose vor allem für Komponenten möglich ist, die in großer Stückzahl verbaut werden und deren Normalverhalten und Verhalten im Fehlerfall gut bekannt ist. Die verschiedenen Betriebszustände von Komponenten und Systemen müssen berücksichtigt werden. Der Aufwand für Installation und Einrichtung der Werkzeuge zur Fehlerdiagnose muss betrachtet werden, damit dieser nicht den Nutzen übersteigt. Der Nutzer muss einen Einfluss auf die Schwellwerte und Alarmgrenzen haben, um sie den Bedürfnissen anpassen zu können.

Von 2001 bis 2004 befasst sich der Annex 40 *Commissioning of Building HVAC Systems for Improved Energy Performance* [16] mit der Inbetriebnahme haustechnischer Anlagen, da festgestellt wurde, dass die meisten Demonstrationsobjekte niemals korrekt

¹<http://www.iea-ebc.org/ebc/>

bzw. effizient betrieben wurden. Die ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating, and Air Conditioning Engineers) definiert mit *Commissioning* einen Prozess der sicherstellen soll, dass Systeme so entworfen, installiert, getestet, betrieben und gewartet werden, dass sie wie beabsichtigt funktionieren. Es ist ein kontinuierlicher oder sich wiederholender Prozess, der zum Ziel hat ein Gebäude effizient zu betreiben, eine detaillierte Begriffsbeschreibung geben Legris et al. in [28]. Ein Teil dieses Ansatzes ist die Verwendung von Methoden zur Fehlerdiagnose. Neben einer Fortführung der Konzepte und Modelle aus den Vorgängerprojekten werden praktische Fragen zur Organisation des Commissionings-Prozesses, der Einbindung in die Gebäudeautomatisationssysteme (GA) und zur Datenvisualisierung betrachtet. Unter den wichtigsten Ergebnissen des Projektes ist, dass die GA-Systeme in den Prozess der Fehlererkennung mit eingebunden werden müssen, um die dort enthaltene Information zu nutzen. Es kommt zu Kommunikationsproblemen durch fehlende Standardisierung und inkompatible Protokolle. Die Anwendung von Fehlerdiagnose-Werkzeugen in der Praxis ist noch gering.

Der Annex 47 *Cost Effective Commissioning of Existing and Low Energy Buildings* (2005-2010) [28, 39, 13, 1] greift die Ergebnisse des Annex 40 auf und hatte einen Schwerpunkt in der praktischen Anwendbarkeit der Methoden, da bisher systematische und standardisierte Werkzeuge fehlen. Es wurden 18 Werkzeuge entwickelt, die sich zu 60% mit Lüftungsanlagen beschäftigen. Weitere Anwendungen sind u.a. Wärmepumpen, Geothermie und Basisüberwachungen des Gebäudeenergieverbrauchs. Der Report empfiehlt die Standardisierung von Schnittstellen, Datenformaten und Vorgehensweisen sowie der Bündelung der Bemühungen im Building Information Modeling (BIM, deutsch: Bauwerksdatenmodellierung) und dem Commissioning. Weiterhin wurde versucht das Kosten-Nutzen-Verhältnis zu beziffern, was auf Grund geringer Datengrundlage weniger belastbar ist als ursprünglich geplant. Die Empfehlungen haben auch sieben Jahre nach Projektende ihre Gültigkeit [11].

Das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) fördert im Rahmen der Forschungsinitiative EnOB - Energieoptimiertes Bauen² - den Forschungsbereich EnBop - Energetische Betriebsoptimierung³. Der Betrieb von Nichtwohngebäuden wird geprüft um ihrer Energiekonzepte zu evaluieren und die Gebäudeperformance mit einfachen, nicht- oder gering-investiven Mitteln zu optimieren. In diesem Programm fanden die beiden Projekte ModBen *Modellbasierte Methoden für die Fehlererkennung und Optimierung im Gebäudebetrieb* (2006 - 2010) [37] und ModQS *Qualitätssicherung des energetischen Gebäudebetriebs* (2010 - 2013) [46] statt, welche die Vorgängerprojekte des aktuellen Forschungsvorhabens OBSERVE *Optimierung und Betriebsführung komplexer Gebäudeenergieversorgungsanlagen*⁴ sind. ModBen baute dabei auf den Ergebnissen von BuildingEQ *Tools and methods for linking EPBD and continuous commissioning* (2007 - 2009) [20] auf, einem Europäischen Forschungsprojekt in dem Verfahren zum Monitoring der Effizienz von bestehenden Gebäuden entwickelt wurden. ModBen war ein Forschungsprojekt zur Entwicklung der modellbasierten Betriebsanalyse von Nicht-Wohngebäuden. Die Analyse soll als Teil eines integrierten Energiemanagements zur Sicherstellung eines langfristig energieeffizienten Betriebs dienen. ModQS hatte darauf aufbauend zum Ziel die Qualitätssicherung des energetischen Gebäudebetriebs, die Erkennung und Nutzung von Einsparpotenzialen sowie die Entwicklung von Verfahren zur messwertbasierten Einregulierung und Betriebsüberwa-

²<http://www.enob.info>

³<http://www.enob.info/de/forschungsfelder/enbop/>

⁴www.ob-serve.de

chung von Heizungsanlagen in Nichtwohngebäuden. Im Arbeitspaket 7 von ModQS konnte eine Vielzahl von Betriebsfehlern identifiziert werden. Gleichzeitig wurde weiterer Forschungsbedarf für Fehlererkennung besonders bei dynamischen Vorgängen, der Automatisierung, der Visualisierung und bei der Analyse von Wechselwirkungen zwischen Teilsystemen festgestellt, welcher in OBSERVE aufgegriffen wird.

Ein weiteres vom BMWi gefördertes Projekt ist der Energie-Navigator *Werkzeug für den energieoptimierten Gebäudebetrieb* (2008 - 2011)⁵. Es wurde ein teilautomatisiertes Werkzeug zur Betriebsführung entwickelt. Schon während der Planung soll die Qualitätssicherung Bestandteil sein um Betriebsfehlern vorzubeugen. Funktionsbeschreibungen werden erstellt, die im späteren Betrieb automatisiert geprüft werden können. Die Autoren identifizieren Forschungsbedarf in der Felderprobung sowie für die Erarbeitung von standardisierten Funktionsbeschreibungen und geeigneten Grenzwerten.

Für die Fehlererkennung und -diagnose existieren auf dem Markt nur wenige, in der Regel auf einzelne Komponenten spezialisierte oder nicht automatisierte Produkte [46, 22]. In ihrer Studie [51] untersuchen Ulickey et al. Werkzeuge zur Fehlererkennung und -diagnose. Sie kommen zu dem Schluss, dass fehlende Information und Fortbildung der Endnutzer ein limitierender Faktor für deren Marktakzeptanz ist. Die Werkzeuge sind noch nicht ausreichend auf dem Markt vertreten um ausreichend Referenzobjekte zu stellen. Standards fehlen und die Diagnosefähigkeiten müssen ausgebaut werden. Die meist manuelle Einrichtung der vorhandenen Werkzeuge erschwert die Marktakzeptanz [25].

In der Praxis in Deutschland gibt es verschiedene Anbieter und unterschiedliche Ansätze zur Analyse des Gebäudebetriebs, von kleinen Dienstleistern bis zu großen Unternehmen, die Hard- und Software sowie Auswertungsdienstleistung anbieten. Im folgenden werden Beispiele genannt. Es werden Kurzzeitmessungen über den Zeitraum von einem Tag bis zu wenigen Wochen mit mobiler Messtechnik angeboten⁶. Dabei werden zentrale Komponenten der Wärmeerzeugung, -verteilung und -nutzung erfasst. Die Messung geschieht in der Regel ohne Eingriff in den Gebäudebetrieb. Die Messdaten werden analysiert und Verbesserungsvorschläge erarbeitet. Dienstleister⁷ bieten auf Basis der Daten aus der Gebäudeautomation oder durch eigenes Messsysteme erfassten Daten die Optimierung des Gebäudebetriebs an. Teils werden im Annex 40 bzw. 47 entwickelte Software und Werkzeuge verwendet. Es wird eine kontinuierliche Überwachung und regelmäßige Berichtserstellung angeboten. Unternehmen⁸ bieten neben Hard- und Software zur Gebäudeautomation auch Softwarelösungen zum Energiemonitoring und zur Betriebsoptimierung. Weitere Firmen⁹ bieten Energie-Contracting an. Dem Kunden werden Monitoring, Beratung, Planung, Umsetzung und Betrieb mit Wartung als Paket angeboten. Die Dienstleistung solcher Firmen enthält auch die Anlagenüberwachung und die Behebung von Ausfällen und Fehlern.

⁵<http://www.enob.info/de/software-und-tools/projekt/details/energie-navigator-werkzeug-fuer-den-energieoptimierten-gebaeudebetrieb/>

⁶Beispiele: <http://www.ratioservice.com>, <http://www.ratiocalor.com>,
<http://www.bauperformance.apleona.com>

⁷Beispiele: <http://www.privaweb.de/produkte/gebaeudeautomation/bi-metrics/>,
<https://www.synavision.de/de/software/>

⁸Beispiel: <http://www.buildingtechnologies.siemens.com/bt/global/de/seiten/home.aspx>

⁹Beispiel: <https://www.eon-connecting-energies.com>

5.2 Fehler in komplexen Heizungsanlagen

In diesem Kapitel wird der Begriff *Fehler* definiert. In komplexen Heizungsanlagen treten die verschiedensten Fehler auf. Der Aufbau und die Auswertung einer Fehlerdatenbank wird vorgestellt. Hierbei können die Fehler in neun verschiedene Kategorien eingeteilt werden. Es sollen die Fehler identifiziert werden, die den größten Einfluss auf Verschleiß, Verbrauch, thermischen Komfort, Sicherheit und/oder Kosten haben. Diese sollen vorrangig bearbeitet werden.

Definition 5.2.1 *Ein **Fehler** (fault) ist eine unerlaubte Abweichung von zumindest einer charakteristischen Eigenschaft oder eines charakteristischen Parameters des Systems vom Normalzustand [18].*

Definition 5.2.2 *Ein Fehler ist **erkennbar**, wenn sein Vorliegen, unabhängig von seiner Größe und Art, eine Änderung im Nominalverhalten des Systemausgangs verursacht [8].*

Für den vorliegenden Bericht bedeutet dies, dass ein Fehler vorliegt, wenn etwas negative Auswirkung auf Verschleiß, Verbrauch, thermischen Komfort, Sicherheit und / oder Kosten hat. Das heißt auch wenn der Betrieb nicht bedarfsgerecht ist - z.B. eine Lüftungsanlage im Betrieb ist wenn sie nicht benötigt wird - liegt ein Fehler vor, obwohl die Komponenten an sich fehlerfrei funktionieren.

In eine Fehlerdatenbank wurden 335 Fehler eingetragen. Die Bearbeitung dieser Datenbank wurde mit Expertenwissen durchgeführt. Quelle für die Einträge sind hauptsächlich die Ergebnisse der Forschungsprojekte ModQS und OBSERVE. Ergänzt werden sie durch Ergebnisse aus der Literatur wie beispielsweise Forschungsprojekten der TU Braunschweig [12] oder Handbüchern [9] sowie den Ergebnissen der Untersuchung weiterer Kundenobjekte. Die Felder der Datenbank sind, teils mit kurzen Erläuterungen, im Anhang A dokumentiert. Sie enthalten Information zu der Art, der Einordnung, den Auswirkungen und Erkennung der erfassten Fehler. Hauptproblem bei der Erstellung der Fehlerdatenbank ist die Tatsache, dass für viele Fehler keine eindeutige Abgrenzungen bestehen oder nicht ausreichend Information zum Fehler vorhanden ist. So kann eine fehlende Nachtabsenkung teilweise eine Folge defekter Komponenten, teilweise von falsch definierten Zeitplänen oder teilweise von einer falschen Planung, die zu falschen Zeitplänen führt, sein. Zum Zeitpunkt der Eintragung in die Fehlerdatenbank ist in der Regel nur wenig Information zum Fehler bekannt, z.B. dass eine Komponente nachts arbeitet, obwohl sie ausgeschaltet sein sollte. Erst später wird die Information zur Ursache und zur Behebung bekannt. Der Fehler wird daher im ersten Schritt dort einsortiert, wo er nach Einschätzung des Bearbeiters am besten passt. Bei neuen Erkenntnissen werden die Beiträge angepasst und ergänzt. Nicht immer ist die Einordnung der Fehler eindeutig, in einigen Fällen wäre es auch möglich, eine alternative Kategorie zu wählen.

Auch die Einordnung zu Häufigkeit und Schwere sowie die Auswirkungen in Hinsicht auf Verbrauch und Folgekosten sind schwer zu beziffern. Eine falsche Reglereinstellung oder kleinere Regleränderungen können beispielsweise bei guter, direkter Kommunikation mit wenig Zeitaufwand und damit niedrigen Kosten behoben werden. Bei komplizierten Kommunikations- und Entscheidungsstrukturen, in denen viele Personen involviert sind, übersteigt der Verwaltungsaufwand den technischen Aufwand zur Fehlerbehebung. Die selbe Reglereinstellung oder kleinere Regleränderung wird auf diesem Weg zeitaufwendig und teilweise solange verzögert, dass es zu Folgeschäden

und damit erhöhten Kosten kommt. Die Einordnung der Kosten und Folgekosten ist vor diesem Hintergrund stark mit den Strukturen vom Gebäudenutzer und -betreiber verbunden. Die Möglichkeit und der Aufwand für die Detektion ist stark abhängig von der Anzahl und Qualität der verfügbaren Datenpunkte.

Nicht-Wohngebäude zeichnen sich durch eine individuelle Planung und eine Vielfältigkeit im Anlagenaufbau aus. Dadurch beeinflusst die Wahl der Gebäude auch stark die Werte und Gewichtungen in der Fehlerdatenbank. Um die Übertragbarkeit der Ergebnisse zu ermöglichen, wurde bei der Auswahl der betrachteten Gebäude darauf geachtet, dass möglichst viele verschiedene Komponenten und Systeme enthalten sind. Weiterhin sind jeweils für mehrere Jahre Betriebsdaten vorhanden. Zudem wurde die Datengrundlage mit Ergebnissen aus der Literatur erweitert. Somit kann davon ausgegangen werden, dass die Auswertung auf andere, ähnliche Gebäude übertragbar ist. Die Verhältnisse werden sich in Abhängigkeit der Komponenten und Systeme verschieben, aber die Prüfung der herausgearbeiteten typischen Fehler wird auch auf diese Gebäude anwendbar sein. Im Anschluss werden die Ergebnisse nach Möglichkeit mit denen des Annex 47 verglichen.

In einer Analyse der durch Expertenwissen gefundenen Fehler wurden neun Fehlerkategorien definiert, in welche die Einträge der Datenbank - mit wenigen Ausnahmen - eingeteilt werden können. Diese sind in Tabelle 5.2-1 zusammengestellt.

Tabelle 5.2-1: Fehlerkategorien

	Bezeichnung / Beschreibung
N	Nutzungszeiten Komponenten sind in Betrieb, obwohl sie nicht benötigt werden. Häufig werden für die Nutzung von Räumen, Zonen, Gebäuden oder Komponenten nicht angemessene Nutzungszeiten in der Regelungstechnik eingestellt. Grenzwerte (Frostschutz, Sommerabschaltung etc.) für außertemperaturabhängige Teilsysteme werden mangelhaft definiert. Durch Anpassung der Parametrierung kann ein meist großes, kostenfreies Einsparpotential genutzt werden.
A	Abstimmung Komponenten In komplexeren Anlagen sind die Komponenten und Teilsysteme häufig nicht richtig aufeinander abgestimmt. Es treten Betriebszustände auf, die nicht beabsichtigt sind und es kommt zu Wechselwirkungen. Dadurch werden Komponenten unnötig belastet und ggf. mehr Energie verbraucht.
H	Hydraulischer Abgleich Durch mangelhafte Hydraulik oder Einstellung der Komponenten fließt in Teilbereichen zu viel oder zu wenig Wasser. Teile der Anlage sind unterversorgt oder es kommt zu unerwünscht bzw. unzulässig hohen Rücklauftemperaturen. Diese verhindern z.B. einen BHKW-Betrieb, verringern einen Brennwertnutzen oder mindern die übertragbare Leistung bei Fernwärmeversorgung.

	Bezeichnung / Beschreibung
K	Komponenten(-teil-)defekt Komponenten fallen aus und erfüllen nicht mehr ihre beabsichtigte Funktion.
S	Schwingende Regelkreise Es wird kein stabiler Betrieb in Regelkreisen erreicht.
L	Einstellung lokaler Komponenten Bei Komponenten, die nicht über eine zentrale Steuerung oder Regelung beeinflussbar sind, kommt es zu Fehlfunktionen, beispielsweise durch Maßnahmen bei Reparaturen und Wartungen.
Z	Zugestellte Verbraucher Durch Zustellen der Heizflächen oder der Zu- bzw. Abluftöffnungen mit Möbeln o.Ä. wird eine ausreichende Wärmeübertragung in Räume behindert.
P	Planung / Ausführung Während der Planungs- und Bauphase oder bei Umbauten kommt es häufig zu Fehlern. Hydraulikschemaschemata werden falsch geplant, Komponenten falsch dimensioniert oder Pläne nicht richtig umgesetzt.
D	Daten Es gibt Ausfälle und Probleme bei der Datenerfassung und -übertragung bzw. -weiterverarbeitung.

Die Fehlerkategorie *Daten* steht nicht im Fokus der Untersuchung, obwohl deren Fehlerhäufigkeit den zweithöchsten Wert darstellt, muss aber teilweise mit betrachtet werden, da er die Verfügbarkeit und Qualität der Messdaten und damit die Eingangswerte für Fehlererkennungsalgorithmen beeinflusst. Für die automatisierte Erkennung sollen Planungsfehler wie fehlerhafte Dimensionierung oder falsche Hydraulik nicht betrachtet werden. Es wird davon ausgegangen, dass eine einregulierte Anlage vorliegt, in der diese Fehler behoben wurden. Grund dafür ist, dass diese Fehler sehr individuell und nicht auf andere Gebäude anwendbar sind. Eine Ausnahme stellen dabei nachträgliche Veränderungen der Hydraulik oder von Komponenten dar, die beispielsweise bei Wartungen oder Reparaturen vorgenommen werden.

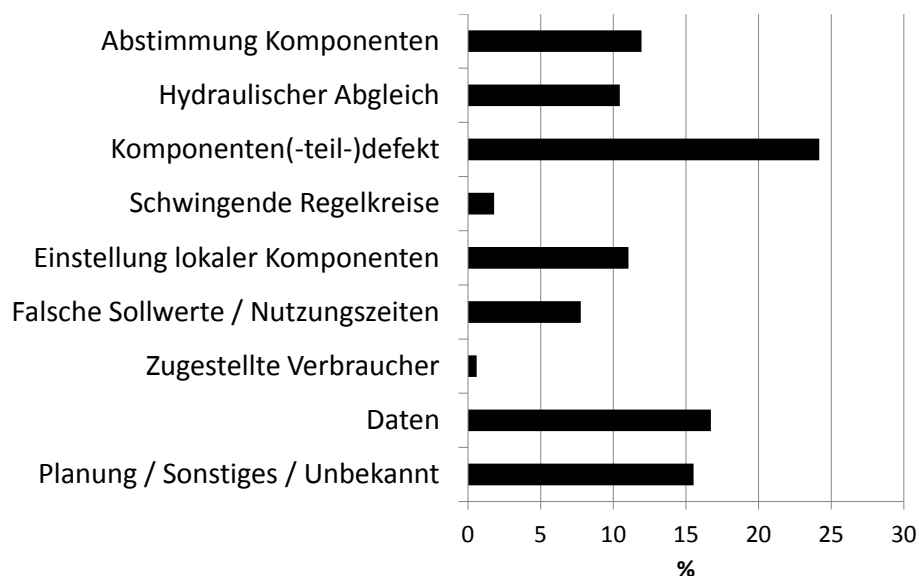


Abbildung 5.2-1: Fehlerhäufigkeit nach Fehlerkategorie

Abbildung 5.2-1 zeigt die Fehlerhäufigkeit in Abhängigkeit der oben genannten und erklärten Fehlerkategorien. In knapp einem Viertel der Fälle handelt es sich um De-

fekte bei Komponenten der Heizungsanlage. Die Datenerfassung und -übertragung ist für mehr als 15% der Einträge verantwortlich. Die Abstimmung von Komponenten, der Hydraulische Abgleich und die Einstellung lokaler Komponenten kommen auf jeweils etwas über 10%. Etwa 15% bilden die Planungsfehler, bzw. Fehler, deren Kategorie unbekannt ist oder die in keine der übrigen Kategorien eingeordnet werden können. Schwingende Regelkreise werden relativ selten als Fehlerkategorie klassifiziert, da die Grenze, wo sie als Fehler angesehen werden hoch gewählt wurde. Ein gewisses Schwingen in der Regelung ist normal und erst wenn das Schwingen negative Auswirkungen auf Verschleiß oder nachfolgende Komponenten hat wurde der Fall in die Datenbank aufgenommen. Ein Schwingen in der Vorlauftemperatur einer statischen Heizung wird nicht als fehlerhafter Betrieb definiert, ein Schwingen in der Vorregelung einer Lüftungsanlage, das z.B. für das Auslösen des Frostschutzes im Winter verantwortlich wird, hingegen schon. Der Anteil, bei dem zugestellte Verbraucher identifiziert wurden, ist sehr gering, was damit zu erklären ist, dass sie in den zur Verfügung stehenden Betriebsdaten nur zu einem geringen Teil erkennbar sind. Somit werden sie nur bekannt, wenn sich der Nutzer über mangelnde Wärme- bzw. Kälteversorgung oder schlechte Luft in einem Raum beschwert und die betreffenden Räume daraufhin gezielt angeschaut werden. Der Fehler wird in der Praxis deutlich häufiger auftreten, ist aber meist nur mit relativ geringen Auswirkungen verbunden. Die Fehler lassen sich in vier Bereiche einteilen, siehe Tabelle 5.2-2.

Tabelle 5.2-2: Bereichseinteilung

	Bezeichnung / Beschreibung
1	Wärmeerzeugung Der Fehler befindet sich an Komponenten oder der Regelung im Bereich der Wärmeerzeugung, wie beispielsweise BHKWs, Mehrkesselanlagen oder Wärmeübertragern. Auch die fehlerhafte Abstimmung mehrerer Wärmeerzeuger wird hier eingeordnet.
2	Wärmeverteilung Der Fehler befindet sich an Komponenten oder der Regelung im Bereich der Wärmeverteilung, wie beispielsweise Pumpen, Speichern oder Mischkreisen. Auch der Hydraulische Abgleich wird hier eingeordnet.
3	Wärmenutzung Der Fehler befindet sich an Komponenten oder der Regelung im Bereich der Wärmenutzung, wie beispielsweise Lüftungsanlagen oder Heizkörpern. Auch fehlerhaft definierte Nutzungszeiten werden hier eingeordnet.
4	Datenerfassung und -übergabe Daten werden fehlerhaft aufgenommen oder fehlerhaft weiterverarbeitet. Hierzu gehören unter anderem fehlerhafte Zuordnungen und Bezeichnungen, Fehler in übergeordneten Sensoren wie z.B. der Außentemperaturmessung oder für das Monitoring benötigten Messpunkten. Fehler bei Sensoren die als Eingangsgrößen für Regler dienen und die eindeutig einem der anderen Bereiche zugeordnet sind, werden hier nicht gezählt. Weiterhin werden diesem Bereich Fehler bei der Datenspeicherung, in Schnittstellen und beim Fernzugriff eingeordnet.

Die Verteilung der Fehler in den Bereichen ist relativ gleichmäßig, siehe Abbildung 5.2-2.

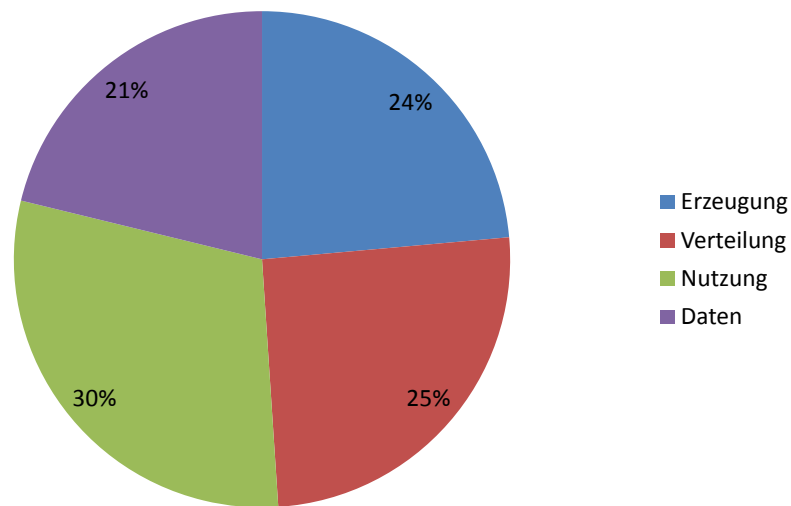


Abbildung 5.2-2: Fehlerhäufigkeit nach Bereichen

Auf Komponenten- bzw. Teilsystemebene betrachtet sind Fehler im Bereich Kessel und Brenner mit 12% am häufigsten, siehe Abbildung 5.2-3. Blockheizkraftwerke (BHKW)

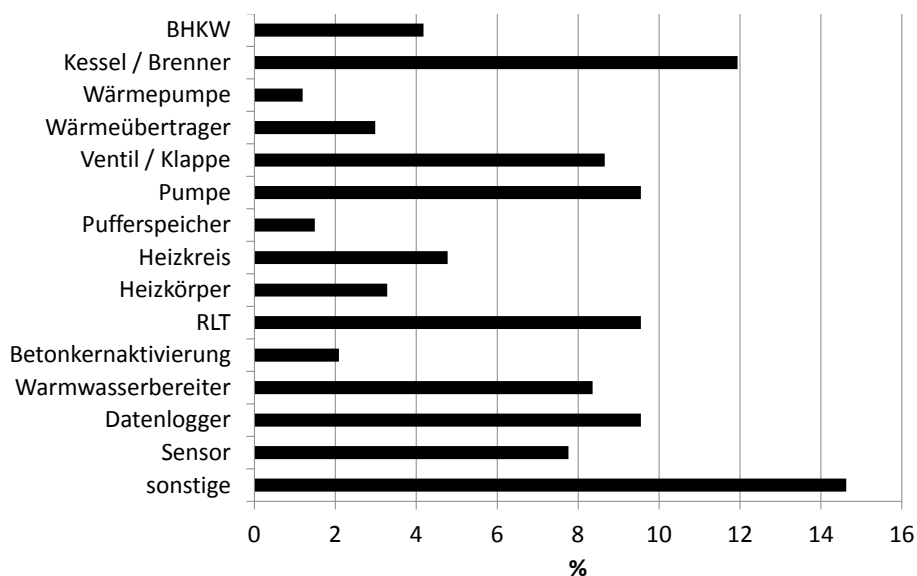


Abbildung 5.2-3: Fehlerhäufigkeit nach Teilsystemen bzw. Komponenten

und Wärmepumpen tragen mit weiteren 5% bei. Häufig sind auch Fehler an Ventilen, Klappen, Pumpen und Warmwasserbereitern. Nennenswert ist auch, dass 8% der Fehler durch die Sensorik und 10% der Fehler durch die Datenerfassung ausgelöst werden. Die verbleibenden 15% ist die Summe weiterer Teilsysteme, die jeweils nur zu einem sehr geringen Prozentsatz genannt werden.

Die in Abbildung 5.2-4 gezeigte Verteilung der Ursachen der Fehler lässt die Tendenz erkennen, dass der Ursprung häufig in der Planung oder deren Umsetzung liegt. Mit aufaddiert 43% stellt dies die Hauptursache dar. Auch Defekte, Handeingriffe und mangelhafte Wartung haben einen großen Anteil. Der abweichende Prozentsatz von der Fehlerursache *Defekt* (13%) und der Fehlerkategorie *Komponenten(-teil-)defekt* (24%) begründet sich daraus, dass eine Komponente auf Grund einer mangelhaften Betriebsweise, z.B. durch falsche Planung verursacht, fehlbelastet werden kann und

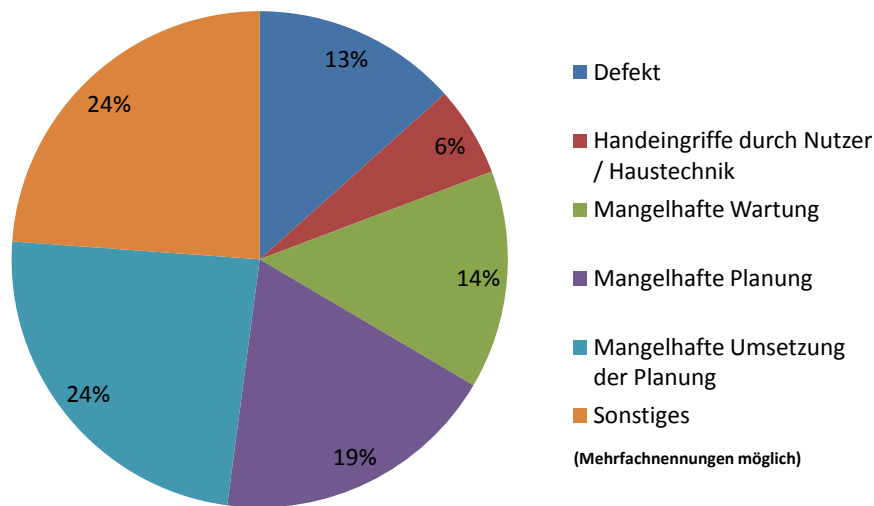


Abbildung 5.2-4: Fehlerhäufigkeit nach Ursache

somit die Fehlerursache die Planung ist. Beispiele für die Ursache *Defekt* sind Materialfehler oder Abnutzung. Die verbleibenden 24% haben unbekannte oder individuelle Ursachen. Dem Umstand, dass die Ursache teilweise nicht eindeutig bestimmbar ist, wurde mit möglichen Mehrfachnennungen Rechnung getragen. Abbildung 5.2-5 zeigt die Auswirkung der Fehler. Knapp die Hälfte der Fehler beeinträchtigt den thermischen

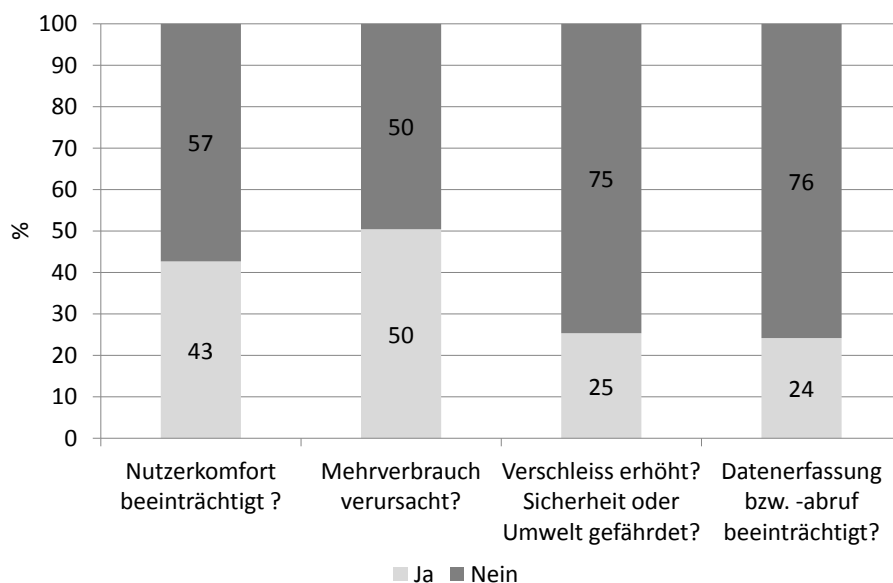


Abbildung 5.2-5: Fehlerhäufigkeit nach Auswirkung

Nutzerkomfort und die Hälfte der Fehler verursacht Mehrverbrauch von Wärme- oder Hilfsenergie. Für diese Untersuchung wurde die Höhe des Mehrverbrauchs nicht betrachtet. In einem Viertel der Fälle ist der Verschleiß erhöht oder die Sicherheit von Menschen bzw. Umwelt gefährdet. Eine zu niedrige Heizkurve beispielsweise verursacht ein Komfortproblem, da die gewünschte Raumtemperatur nicht mehr erreicht werden kann, der (Wärme-)Energieverbrauch hingegen wird nicht negativ beeinflusst. Eine Pumpe, die mangels korrekter Abstimmung gegen ein geschlossenes Ventil fördert, hat keinen Einfluss auf den thermischen Komfort, der Verschleiß und der Strom-

verbrauch hingegen steigen. In einem Viertel der Fälle sind die Datenerfassung oder der Datenabruf beeinträchtigt.

Analog zu Abbildung 5.2-5 wurde auch Abbildung 5.2-6 erstellt. 62% der Fehler sind

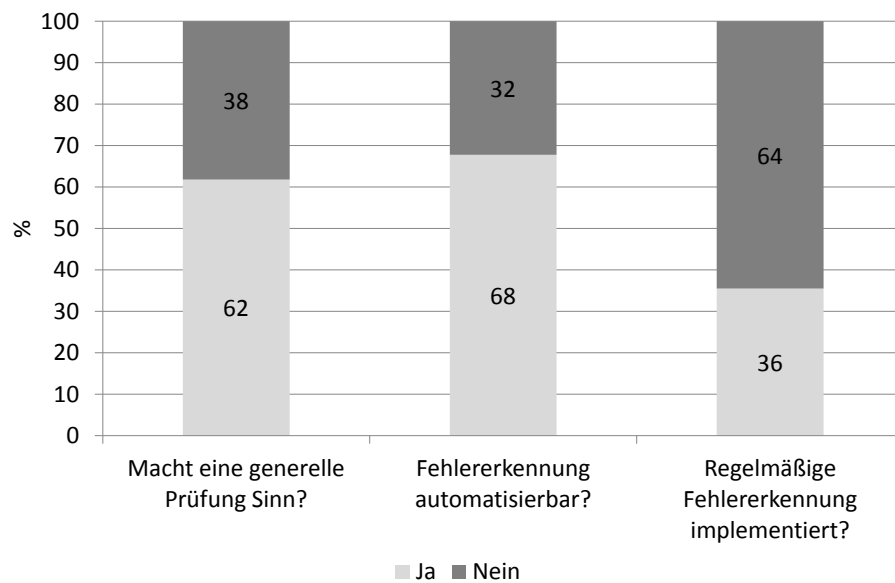


Abbildung 5.2-6: Fehlerhäufigkeit nach Übertragbarkeit

allgemeingültig und kommen für eine automatisierte Überprüfung in Frage, 38% sind so individuell, dass die Wahrscheinlichkeit, dass sie in dieser Form in einer anderen Anlage vorkommt, zu gering ist, um eine generelle Prüfung zu rechtfertigen. Die Fehlererkennung ist automatisierbar, wenn für eine Komponente oder ein (Teil-)System

- Expertenwissen allgemein anwendbar ist, und z.B. für die Definition von Regeln und Kenngrößen angewendet werden kann,
- mit ausreichend Wissen über den physikalischen Prozess und / oder über (fehlerfreie) historische Betriebsdaten Nominalmodelle erstellt werden können,
- oder Daten aus mehreren, vergleichbaren Anlagen vorliegen und untereinander auf Abweichungen geprüft werden.

In dem Kapitel 5.3.1 werden diese Möglichkeiten aufgegriffen und erläutert. Für 68% der Fälle trifft mindestens einer der Punkte zu und die Erkennung ist automatisierbar, zu 36% ist diese Erkennung mit einer der in den Kapiteln 5.4 bis 5.6 dargestellten Vorgehensweisen auch implementiert und wird regelmäßig durchgeführt. Dass nur etwa die Hälfte der möglichen Automatisierung durchgeführt wurde, liegt unter anderem daran, dass einige Demonstrationsgebäude, in denen Fehler identifiziert wurden, nicht bis zum Ende einer kontinuierlichen Betriebsüberwachung unterzogen wurden. Auch für einige Einträge die aus der Literatur übernommen wurden konnte mangels passender Betriebsdaten keine Überprüfung umgesetzt werden.

Weiterhin wurde dokumentiert, auf welche Weise man auf den Fehler aufmerksam wurde, siehe Abbildung 5.2-7. Über die Hälfte der Fehler wurde durch eine automatische oder manuelle Analyse der Trenddaten gefunden. Mit zunehmender Entwicklung von Methoden der Fehlererkennung und deren Anwendung geht der Anteil der manuell gefundenen Fehler zurück. Mit 13% folgen Einträge die aus der Literatur übernommen werden konnten, Quellen sind unter anderem [9, 12, 15, 34, 45]. Gleichauf liegen

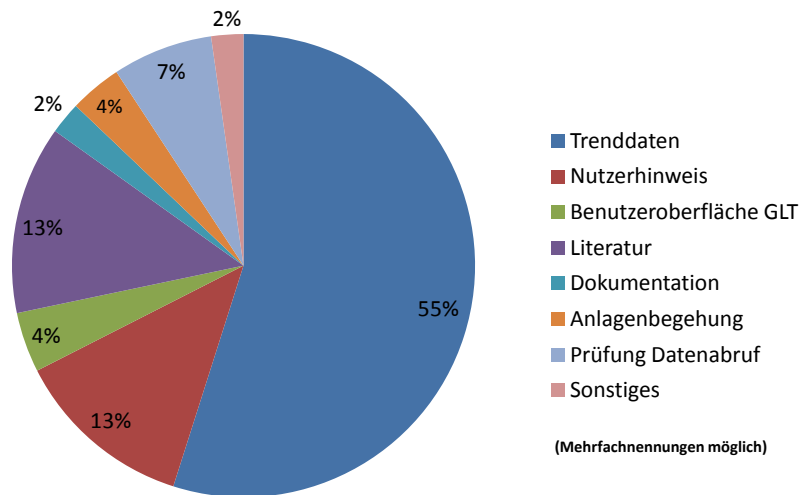


Abbildung 5.2-7: Fehlerhäufigkeit nach Hinweis

Fehler, die über eine Rückmeldung von Gebäudenutzer oder -betreiber entdeckt werden konnten. Teilweise wird bei der Meldung der konkrete Fehler genannt, häufig aber nur dessen Auswirkungen mit der Bitte, die Ursache zu identifizieren. Weitere Fehler konnten bei Anlagenbegehungen, der Prüfung der Dokumentation zu Gebäude und Heizungsanlage sowie dem Betrachten der Nutzeroberfläche der Gebäudeleittechnik - vor Ort und per Fernzugriff - identifiziert werden. Die Protokolldatei des Datenabrufs gab in 7% der Fälle den Hinweis auf einen Fehler bei der Datenübertragung. Mehrfachnennungen sind möglich, da teilweise nicht eindeutig zu klären ist, wie der erste Hinweis erfolgte, bzw. es eine Kombination aus mehreren Arten war.

Aus der Datenbank wurden typische, in Laufe dieser Untersuchung aufgetretene Fehler herausgearbeitet. Sie sind im Anhang B aufgeführt. Aus dieser Liste eignen sich für die Entwicklung und Erprobung von Fehlererkennungsalgorithmen besonders die Erkennung von Komponentendefekten, Handeingriffen und Umbauten. Die betreffenden Teilsysteme sind die Wärmeerzeugung, dabei besonders Blockheizkraftwerke und Kesselanlagen, sowie folgende Komponenten der Wärmeverteilung: Pumpen, Ventile, Klappen und das Rohrnetz im allgemeinen. Die Auswahlkriterien hierfür sind die Häufigkeit des Auftretens, die Schwere der Auswirkungen auf Komfort, Verbrauch und Kosten sowie eine ausreichende Datengrundlage, um die Methoden auch anzulernen, evaluieren und prüfen zu können. In den Anwendungskapiteln 5.4 bis 5.6 werden die Fehler nach Erkennungsansatz geordnet aufgegriffen.

Im Report 3 des Annex 47 [13] werden 44 bestehende Demonstrationsgebäude aus sechs Ländern, mit einem Schwerpunkt auf den USA, betrachtet. Dabei wird der größte Teil der Probleme in dem Lüftungsanlagen (38%) gefunden, zu 14% sind mehrere Systeme aus Heizung und Lüftung betroffen und zu jeweils etwa 8% sind die Bereitstellung von heißem oder kaltem Wasser oder Komponenten der Regelung betroffen. Die Ursache der Probleme, bezogen auf den Lebenszyklus des Gebäudes, können zu 31% auf die Planung, zu 17% auf den Bau sowie zu 42% auf den Betrieb und die Wartung zugeordnet werden. Dies deckt sich in etwa mit den Ergebnissen die für die Fehlerursache in Abbildung 5.2-4 dargestellt sind. Zu 19% ist der Fehler durch die Planung, zu 24% durch die Umsetzung der Planung sowie zu 33% im Betrieb (Defekte, Handeingriffe, Wartung) verursacht. Somit sind, wie erwartet, die Verteilungen der Probleme zugeordnet zu den Komponenten zwischen dem Annex 47 und denen der Fehlerdatenbank auf Grund des unterschiedlichen Fokus auf Lüftungen bzw. Heizungen nicht vergleichbar, die Verteilung der Ursachen ist trotz der unterschiedlichen Komponenten relativ ähnlich.

5.3 Grundlagen der Fehlererkennung

In diesem Kapitel werden in diesem Bericht verwendete Fachbegriffe zur Fehlererkennung definiert. Hindernisse für und Anforderungen an die Fehlererkennung werden beschrieben. Es folgt eine Einführung in die Methoden der Fehlererkennung und deren Einordnung zueinander. Vervollständigt wird das Kapitel mit der Einführung von Tensoren und der Tensorzerlegung. Tensoren können genutzt werden, um Daten systematisch angeordnet abzuspeichern. Im Zusammenhang mit der Tensorzerlegung ergeben sich neuartige Methoden zur Fehlererkennung, deren Vorteile bisher wenig im Bereich der Heizungsanlagen genutzt werden. Der Abschnitt 5.3.3 schafft das für die Anwendung notwendige Verständnis.

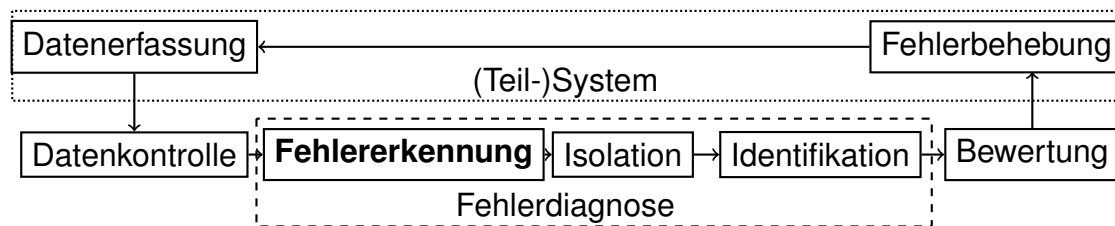


Abbildung 5.3-1: Einordnung der Fehlererkennung

Nach einer Datenkontrolle, in der die Betriebsdaten auf Vollständigkeit und Plausibilität geprüft werden, ist die Fehlererkennung der nächste Schritt in der Auswertung der Betriebsdaten, die im (Teil-)System erfasst werden, siehe Abbildung 5.3-1. Werden Fehler erkannt, werden sie in der Diagnose weiter untersucht und im folgenden Schritt bewertet. Wenn möglich und nötig werden die Fehler behoben. Die Tätigkeiten sind dabei wie folgt definiert [18, 32] :

- Fehlererkennung: Bestimmung ob ein Fehler im System und den Zeitpunkt der Erkennung vorliegt.
- Fehlerisolation: Bestimmung vom Ort (Komponente, Teilsystem) eines Fehlers, folgt auf die Fehlererkennung.
- Fehleridentifikation: Bestimmung der Art und der "Größe" eines Fehlers, folgt auf Fehlerisolation.
- Fehlerdiagnose: Die Diagnose beinhaltet die drei Schritte Fehlererkennung, -isolation und -identifikation.
- Monitoring: Kontinuierliche Onlineüberprüfung eines Systems, durch Datenerfassung und Erkennung und Anzeigen von irregulärem Verhalten.

Die Begrifflichkeit für Zustände und Signale wurde von Isermann und Balle [18] übernommen:

- Störung: Ein unbekannter (und unkontrollierter) Eingang auf das System.
- Residuum: Ein Fehlerindikator, basierend auf der Abweichung zwischen Messwerten und Berechnungen.
- Symptom: Eine beobachtbare Veränderung vom Normalverhalten.

Bei den Alarmen unterscheidet man zwischen den folgenden Typen [40] :

- Korrekter Alarm: Ein tatsächlich vorliegender Fehler wurde im Rahmen der Fehlererkennung richtig erkannt.
- Unterbliebener Alarm: Ein Fehler liegt vor, wird aber im Zuge der Fehlererkennung nicht erkannt.
- Fehlalarm: Es wird ein Fehler gemeldet, obwohl das betrachtete System fehlerfrei arbeitet.

Weitere hier verwendete Begriffe:

- Schwellenwert: Grenzwert für das Residuum, ab der ein Fehler vorliegt.
- Sensitivität: Beschreibt, wie stark die Residuen auf einwirkende Fehler reagieren.
- Robustheit: Beschreibt, wie stark die Residuen auf einwirkende Störgrößen reagieren.
- Komponente: Ein Komponente ist die kleinste messtechnisch Erfasste Einheit, im Sinne dieser Untersuchung bedeutet dies Pumpen, Kessel, Ventile etc..
- Teilsystem: Mehrere Komponenten können zu einem Teilsystem zusammengefasst werden. Beispiele sind: Kessel mit dazugehöriger Pumpe, Heizkreis oder Warmwasserbereiter.
- System: Mehrere Teilsysteme ergeben zusammengefasst ein System. Beispielsweise Mehrkesselanlagen mit mehreren Kesseln, Pumpen und Klappen.

In einem geschlossenen Regelkreis wird die Regelabweichung e_r aus der Führungsgröße w und der Ausgangs- bzw. Regelgröße y bestimmt, siehe Abbildung 5.3-2. Der

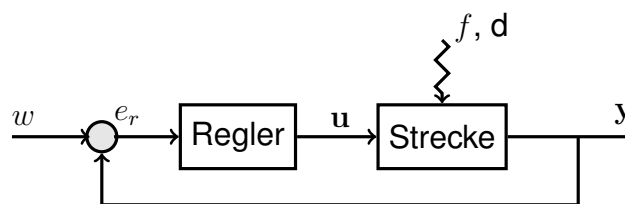


Abbildung 5.3-2: Geschlossener Regelkreis

Ausgang des Reglers ist die Stellgröße u , der auf die Strecke wirkende Fehler wird mit f bezeichnet. Störgrößen werden mit d bezeichnet, diese unbekannten und unkontrollierten Eingänge erschweren die Fehlererkennung. Beispiele dafür sind Nutzer- und Witterungseinflüsse. Sie müssen bei der Schwellwertbestimmung berücksichtigt werden.

In einer Regel- bzw. Steuerstrecke kann der Fehler in den Aktoren, in der Strecke oder in der Sensorik vorkommen, siehe Abbildung 5.3-3. Die Fehlererkennung geschieht dabei mit der Stellgröße u_{reg} , die in die Strecke hineingegeben wird und der Ausgangsgröße y_{mess} , die von der Sensorik ausgegeben wird. Mögliche Sensorfehler werden in Abschnitt 5.4.2 beschrieben. Eine Unterscheidung zwischen den einzelnen Fehlern in Aktorik, Prozess und Sensorik (f_{aktor} , $f_{prozess}$, f_{sensor}) findet in dieser Untersuchung

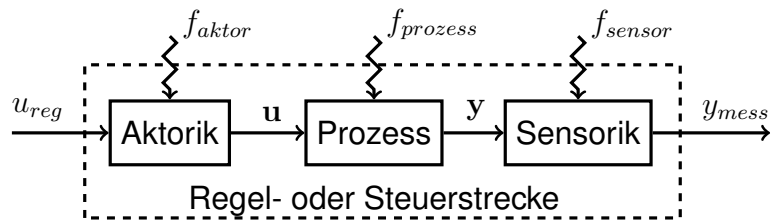


Abbildung 5.3-3: Fehler in einer Regel- oder Steuerstrecke

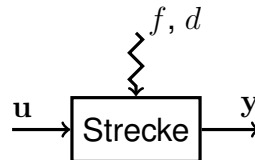


Abbildung 5.3-4: Fehler

nicht statt. Es ist keine ausreichende Datengrundlage dafür vorhanden und somit nicht trennbar, in welchem dieser Bereiche der Fehler vorliegt. Da die Fehlererkennung im Fokus steht und keine Fehlerdiagnose durchgeführt werden soll, ist diese Vereinfachung statthaft. Daher können in dieser Untersuchung die Begriffe Stellgröße u , Ausgangsgröße y , Störgröße d und Fehler f wie in Abbildung 5.3-4 dargestellt verwendet werden. Die Strecke entspricht der Aktorik, allen Komponenten des Prozesses sowie der Sensorik.

Wichtig ist, zu welchem Zeitpunkt und auf welcher Plattform die Fehlererkennung durchgeführt wird. Hierfür werden im wesentlichen zwei Ansätze unterschieden: online und offline. Bei der online Fehlererkennung findet die Überwachung in Echtzeit statt. Sie kann direkt in der Managementebene der Gebäudeleittechnik stattfinden oder auf einem separaten Rechner, der über eine direkte Datenverbindung angeschlossen ist, durchgeführt werden. In beiden Fällen ist die Abstimmung mit der Regelungstechnik von Bedeutung, entweder müssen die Routinen direkt in die Regelungssoftware integriert werden oder es muss eine Schnittstelle bereitgestellt werden, mit der die jeweils aktuellen Daten weitergegeben werden. Bei der offline Fehlererkennung hingegen werden die Betriebsdaten gespeichert und für einen Zeitraum in der Vergangenheit analysiert. Schnittstellen zur Datenbereitstellung müssen installiert werden.

In dieser Untersuchung wird die offline Fehlererkennung angewandt, hierfür werden die Daten von den Heizungsanlagen über einen Fernzugriff ausgelesen und auf einem externen Rechner gespeichert. Somit wird bei der Anlage vor Ort keine Echtzeitschnittstelle oder Auswertesoftware benötigt. Für die Auswertung wird nur ein Rechner und somit nur eine Lizenz der verwendeten Software benötigt. Die Methoden der Fehlererkennung können auf eine einheitlich strukturierte Datenbank zugreifen und sind unabhängig von der vor Ort verbauten Hard- und Software. Dieses Vorgehen hat gegenüber der online Fehlererkennung auch Nachteile, auf Fehler kann erst mit einer gewissen Verzögerung reagiert werden und eine automatisierte Beeinflussung des Anlagenbetriebs ist nicht oder nur stark erschwert möglich. Die Zeitkomponente wird als nicht kritisch angesehen, da eine tägliche Überprüfung der in Kapitel 5.2 herausgearbeiteten Fehler ausreichend ist. Sicherheitsrelevante Defekte müssen über Sicherheitseinrichtungen der Komponenten und in der Steuerungsebene der Gebäudeautomation unabhängig erkannt werden, da diese Überprüfungen auch bei Ausfall von Datenverbindungen funktionieren müssen. Als Beispiel sei hierfür ein Kesseltemperaturwächter

genannt, der bei Übertemperatur den Kessel ausschaltet. Bei dem Abruf der Betriebsdaten für die offline Fehlererkennung kann es zu Problemen mit den Schnittstellen kommen, diese sind in der Regel aber kleiner oder maximal gleich denen der online Überwachung, da auch eine Echtzeitschnittstelle mit einem externen Datenlogger für die Erfassung der Daten verwendet werden kann.

Durch die Installation geeigneter Schnittstellen und ggf. dem temporären Zwischenspeichern und Aufbereiten von Betriebsdaten ist es grundsätzlich möglich, die in diesem Bericht verwendeten Methoden in einer Echtzeitüberwachung zu nutzen. Dieser Ansatz wird aber nicht weiter behandelt, da er für die Leistungsfähigkeit der Fehlererkennung nicht von Bedeutung ist. Auch die aktive Beeinflussung der Heizungsanlage, d.h. eine automatisierte Handlung im Fehlerfall, ist nicht Ziel dieser Untersuchung.

Die Betriebsanalyse und Fehlererkennung wird durch eine Vielzahl von Hemmnissen erschwert, siehe beispielsweise die Ergebnisse von ModQS [46] und dem Annex 34 [21]. In den Betriebsdaten von (Teil-)Systemen und Komponenten gibt es wertekontinuierliche Signale wie Temperaturen oder Volumenströme sowie wertediskrete Signale wie dem Brennerbetriebszustand oder dem Betriebsmodus eines Heizkreises. Die Dynamik ist nichtlinear. Durch das Schaltverhalten der wertediskreten Signale kommt eine hybride Komponente hinzu. Diese beiden Eigenschaften der meisten (Teil-)Systeme von Heizungsanlagen erschweren die Entwicklung von Modellen und Algorithmen [41]. Die komplexen Anlagen sind alle voneinander unterschiedlich, so dass für ein Gebäude entwickelte und konfigurierte Algorithmen und Modelle nur für Teilbereiche für andere Gebäude übernommen werden können und an die jeweiligen Bedingungen angepasst werden müssen. Die Informationslage in Bestandsanlagen ist häufig ungenügend, detaillierte Pläne und Funktionsbeschreibungen sind selten verfügbar. Die Verfügbarkeit von Messdaten schränkt den Detailgrad in der Fehlererkennung ein. Häufig ist die beabsichtigte Funktionsweise nicht oder nur schlecht dokumentiert, Änderungen, die im Laufe des Betriebs vorgenommen werden, werden nicht dokumentiert.

Für eine Analyse des Anlagenbetriebs und zur Fehlererkennung werden Betriebsdaten benötigt, die

- eine ausreichende Genauigkeit aufweisen,
- in einer ausreichend hohen Zeitauflösung aufgenommen wurden,
- vollständig sind,
- mit eindeutigen, zuzuordnenden Bezeichnungen versehen sind,
- und so bereitgestellt werden, dass sie automatisiert weiterzuverarbeiten sind.

Diese Punkte werden häufig nicht eingehalten. Historische Datenaufzeichnungen sind lückenhaft, da es zu Ausfällen in Erfassung und Speicherung kommt. Bei Bestandsgebäuden ist damit zu rechnen, dass Anlagen und Komponenten nicht korrekt betrieben werden [22], die Daten können fehlerhafte Betriebszustände enthalten. Eine Nutzung dieser Daten für Modellbildung oder zur Bestimmung von Fehler-Schwellenwerten ist nur mit einer Nachbearbeitung möglich. Nicht immer sind alle möglichen Betriebszustände in den historischen Daten enthalten.

In vielen Fällen werden nur die für die Regelung notwendigen Informationen erfasst, andere, für eine Auswertung wichtige Daten, wie z.B. Rücklauftemperaturen, Drücke

oder Durchflüsse zentraler Komponenten, werden aus Kostengründen nicht bereitgestellt. Statussignale, die für die Erkennung von Betriebszuständen benötigt werden, werden häufig nicht gespeichert. Die Fehler sind somit nicht, oder nur indirekt in den Daten enthalten. Witterungs- und Nutzungseinflüsse werden häufig messtechnisch nicht erfasst, müssen aber bei der Auswertung berücksichtigt werden. Darüber hinaus werden häufiger auch in Teilbereichen unterschiedliche Gebäudeleittechniken und Betriebssteuerungen verwendet, so dass die Information nicht oder nur mit erheblichem Aufwand zusammengeführt und zentral genutzt werden kann.

Anforderungen an Methoden zur Fehlererkennung sind [21] : Sie sollen für den Nutzer einfach zu verstehen, einzurichten und anzupassen sein. Sie sollen in vorhandene Umgebungen, wie z.B. einer Gebäudeleittechnik oder für das Gebäudemonitoring spezialisierten Webportalen integrierbar sein. Die Erkennung muss sensitiv und robust sein. Gravierende, offensichtliche Fehler müssen gefunden werden, da sonst keine Glaubwürdigkeit mehr besteht. Dabei sollte es keine oder nur selten Fehlalarme geben, da die Erkennung sonst abgeschaltet oder ignoriert wird. Fehler müssen zeitnah erkannt werden. Der Betrieb (Versorgungsaufgabe, Wartung) darf nicht negativ beeinflusst werden. Die Kosten müssen im Verhältnis zu den Einsparungen im Energieverbrauch, den Kosten für vermiedene Instandhaltungsarbeiten sowie der verbesserten Versorgung bzw. der erhöhten Versorgungssicherheit stehen.

5.3.1 Methoden der Fehlererkennung

Im Folgenden befindet sich ein Überblick über verschiedene Ansätze der Fehlererkennung und deren Einordnung, die im Bereich der Betriebsanalyse von Heizungsanlagen angewandt werden können.

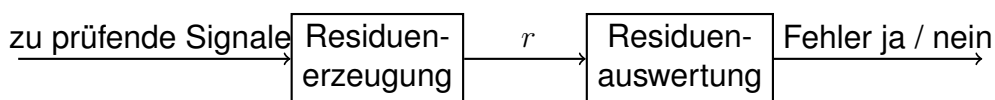


Abbildung 5.3-5: Residuen

Gemeinsam haben alle Ansätze zur Fehlererkennung, dass aus einem oder mehreren Signalen oder Messungen ein Residuum r gebildet und dieses in einem weiteren Schritt ausgewertet wird, siehe Abbildung 5.3-5. Die zu prüfenden Signale können Messdaten und / oder Ein- bzw. Ausgangsgrößen von Reglern sein. Auch Ergebnisse von modellbasierten Berechnungen können hinzugezogen werden. In den Unterkapiteln 5.3.1.1 bis 5.3.1.3 wird gezeigt, wie das Residuum für den jeweiligen Ansatz bestimmt werden kann. Paritätsgleichungen werden in 5.3.1.5 vertieft betrachtet, da diese im Anwendungsteil des Berichts zusammen mit den in 5.3.2.2 eingeführten Zustandsraummodellen angewandt werden.

Die Residuen sollten sensibel auf Fehler ansprechen, aber robust gegen andere Abweichungen im Betrieb oder Algorithmenerstellung wie Rauschen, Änderung des Betriebspunktes, Modellierungsfehler etc. sein [58] . Die Residuenerzeugung bei Fehlererkennung für eine Regel- oder Steuerstrecke kann aktiv oder passiv erfolgen. Bei aktiver Residuenerzeugung werden gezielt Eingangssignale u vorgegeben um die Systemantwort daraus zu beobachten und auszuwerten. Im passiven Fall wird u nur durch den Regler bzw. die Steuerung für den normalen Gebäudebetrieb beeinflusst. Der Aufwand für aktive Residuenerzeugung ist höher, dafür ist die Korrelation zwischen

Diagnose und System besser, die Toleranzen und Modellunsicherheiten können verringert werden. In dieser Untersuchung wird ausschließlich eine passive Residuenerzeugung verwendet, da für die aktive Erzeugung keine Daten vorliegen. Die Möglichkeit für eine aktive Beeinflussung der Eingangssignale ist bei den vorhandenen Demonstrationsobjekten entweder nicht möglich oder nicht vorgesehen.

Mit dem Residuum wird im Vergleich mit einem Fehler-Schwellenwert geprüft, ob ein Fehler vorliegt oder nicht. Schwellenwerte werden benötigt, um zu verhindern, dass Unsicherheiten wie fehlerhafte Messungen, ungenaue Modellbildung oder eine falsche Betriebspunktbestimmung Fehlalarme auslösen [7]. Dexter und Vaezi-Nejad unterscheiden in der Fehlererkennung und -diagnose zwischen drei verschiedenen Typen von Schwellenwerten:

- Schwellenwert zur Fehlererkennung: Grenzwert für die maximal erlaubte Abweichung zwischen geschätztem und gemessenen Prozessparameter ab dem ein Fehler angenommen wird.
- Schwellenwert zur Erkennung des Betriebsmodus: Grenzwerte, bei deren Einhaltung ein bestimmter Betriebsmodus angenommen wird.
- Alarm-Schwellenwert: Grenzwert für die Fehlerwahrscheinlichkeit ab dem ein Fehler gemeldet wird.

Zur Bestimmung der Schwellenwerte nennen Dexter und Vaezi-Nejad [7] drei grundlegende Möglichkeiten:

- Heuristische Methoden: Basiert auf Expertenwissen, beispielsweise gewonnen durch die Analyse von vergleichbaren Systemen und Komponenten. Die Schwellenwerte werden nach Versuch und Irrtum auf bekannt fehlerfreie Trenddaten angepasst.
- Statistische Methoden: Mittelwerte und Standardabweichungen der Residuen werden genutzt um die Fehlergrenze zu bestimmen. Auch hierfür werden fehlerfreie Betriebsdaten benötigt.
- Vom Nutzer gewählte Schwellenwerte: Der Nutzer (qualifiziertes Personal der Haustechnik, Regelungstechniker oder Experten im Gebiet der Analyse von Heizungsanlagen) passen die Schwellenwerte so an, dass ein angemessenes Verhältnis von Sensitivität und Anzahl der Fehlalarme erreicht wird. Dieses Vorgehen ist nur erfolgreich, wenn der Nutzer einen Vorteil davon hat, dass Fehler gefunden werden, da er sonst die Grenze auf einen hohen Wert setzt um keine Meldungen zu bekommen. Auch müssen die gleichzeitig beeinflussten Überprüfungen in etwa gleich sensitiv sein, damit der Wert für alle angemessen ist.

Die Festlegung der Schwellenwerte ist ein Kompromiss zwischen der Sensitivität der Fehlererkennung und der Anzahl an Fehlalarmen die generiert werden. Bei zu hohen Grenzen werden keine Fehler mehr gefunden, bei zu niedrigen kommt es zu einer nicht mehr akzeptablen Zahl an Fehlalarmen. Unter Umständen müssen die Werte an die Betriebsmodi angepasst werden um das nichtlineare Verhalten auszugleichen. Weiterhin kann das Residuum über Klassifikatoren wie Support Vector Machines (SVM), Fuzzy-Logik oder Neuronale Netze ausgewertet werden.

Die Literaturrecherche zeigt, dass die Autoren für die Klassifizierung der Erkennungs- und Diagnosemethoden unterschiedliche Systeme wählen. Einen grundlegenden Überblick über die Methoden zur Fehlererkennung und -diagnose bieten die Veröffentlichungen von Katipamula und Brambley in [22] - mit Aktualisierung der Untersuchung in [25] -, Venkatasubramanian et al. in [55, 53, 54] sowie von Isermann in [17]. Isermann unterteilt die Methoden der Fehlererkennung nach der Anzahl der genutzten Signale, siehe Abbildung 5.3-6. Bei der Nutzung von nur einem Signal werden einfache Metho-

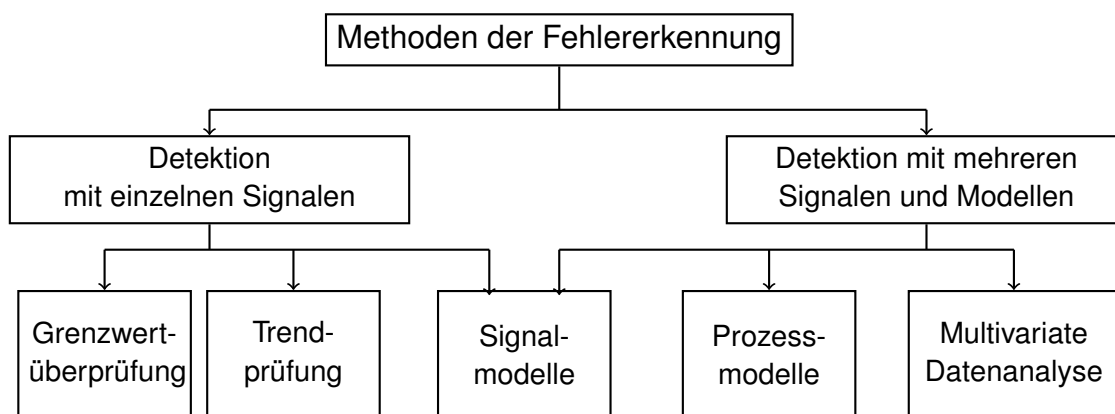


Abbildung 5.3-6: Methoden der Fehlererkennung [17]

den wie Grenzwertprüfung oder die Prüfung auf Veränderung genannt. Dabei werden Kenngrößen wie Minimal- oder Maximalwert, Mittelwert oder Varianz verwendet. Auch weitere statistische Methoden fallen in diese Kategorie. Signalmodelle nutzen die Ausgangsgrößen y und vergleichen diese mit dem Nominalverhalten. Ein Beispiel für diesen Bereich sind Fourieranalysen. Prozessmodelle nutzen sowohl die Eingangs- als auch die Ausgangsgrößen und vergleichen diese mit dem Nominalverhalten. Genutzt werden können unter anderem die Parameterschätzung, Zustandsbeobachter oder Paritätsgleichungen. In der multivariaten Datenanalyse wird die Hauptkomponentenanalyse (Principal Component Analysis, PCA) genutzt um umfangreiche Datensätze zu strukturieren, zu vereinfachen und zu veranschaulichen.

Katipamula und Brambley [22] ordnen die Diagnosemethoden in qualitative und quantitative Modelle sowie in trenddatenbasierte Ansätze ein. Im ModQS- Endbericht [46] wird die Fehlererkennung in manuelle, regelbasierte und modellbasierte Ansätze unterteilt. Die modellbasierten Methoden werden dabei in messdatenbasiert bis simulationsbasiert eingeordnet. Diese Einteilung wird für den vorliegenden Bericht übernommen, da sie dem Arbeitsablauf entspricht, der sich in der praktischen Anwendung der Methoden eingestellt hat. Die Prüfung mit Expertenwissen, signalgestützter oder modellbasierter Erkennung erfolgt jeweils mit einer anderen Software. Weiterhin wurde die Möglichkeit einer Hardwareredundanz ergänzt. Somit ergibt sich die in Abbildung 5.3-7 dargestellte Klassifizierung. Es wird unterschieden zwischen der manuellen Prüfung mit Expertenwissen, signalgestützter und modellbasierter Erkennung und der Nutzung von Hardwareredundanz. Die ersten drei Ansätze verwenden eine einfache Hardwareausstattung, d.h. Sensoren, Komponenten oder Regler werden nicht doppelt ausgeführt. Im Gegenteil dazu nutzt die Hardwareredundanz zusätzliche Hardware zur Fehlererkennung. In den folgenden Unterkapiteln werden die Ansätze beschrieben. Es ist zu berücksichtigen, dass eine scharfe Trennung zwischen den verschiedenen Ansätzen nicht immer möglich ist.

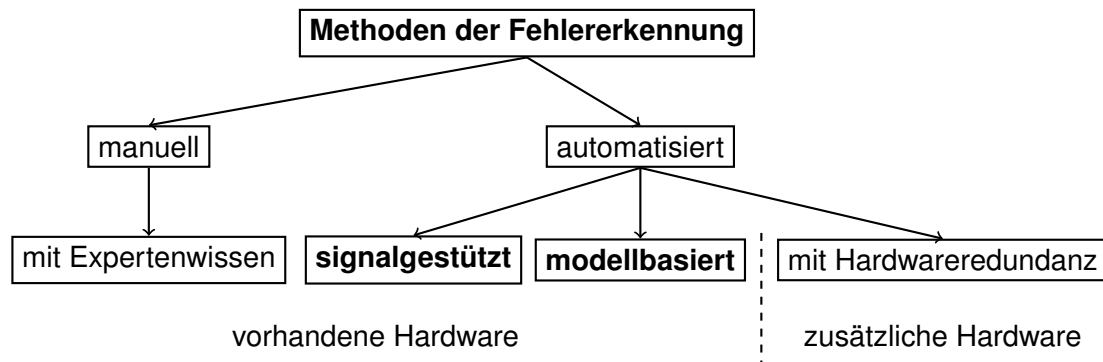


Abbildung 5.3-7: Methoden der Fehlererkennung

5.3.1.1 Methoden basierend auf Expertenwissen

In diesem Fall wird die Erfahrung und das Wissen eines Menschen zur Fehlererkennung genutzt. Das Residuum kann aufgefasst werden als die Abweichung von dem Verhalten, dass der Experte für die jeweilige Komponente oder das jeweilige System erwartet und beobachtet. Die Einschätzung, ob ein Fehler vorliegt oder nicht, beruht auf der Erfahrung des Experten. Die Fehlererkennung kann durch eine visuelle Datenanalyse (siehe Kapitel 5.4.3) oder das Abarbeiten von Prüflisten geschehen. In einem Forschungsbericht der Universität Stuttgart [47] werden beispielsweise Prüflisten zur Verbesserung des Gebäudebetriebs an den Anlagen zur Heiz- und Raumluftechnik, zur Trinkwassererwärmung, zur Kühlung und zur Beleuchtung sowie deren zugehörige MSR-Technik vorgestellt. Diese sind an nicht akademisches, technisches Personal gerichtet. Das Abarbeiten von Prüflisten erfordert entsprechende Sachkenntnis. Das Prüfen mit Expertenwissen ist unverzichtbar für Fehler, für die kein Automatisierungsansatz gefunden werden kann oder wo der Automatisierungsaufwand in keinem Verhältnis zum Nutzen steht, beispielsweise für Fehler die so individuell sind, dass ein einmaliges Auftreten angenommen wird.

5.3.1.2 Signalgestützte Methoden

Bei signalgestützter Fehlererkennung (auch signalbasierte Fehlererkennung genannt) werden die gemessenen Signale ausgewertet. Bei der Detektion mit einzelnen Signalen wird der Messwert oder dessen Ableitung gegen einen, ggf. adaptiven, Schwellwert oder auf Veränderung, beispielsweise über Mittelwert und Standardabweichung geprüft. Einige Beispiele für diese Art der Erkennung sind: Das Überwachen von Kennwerten und Kennlinien, die Grenzwertüberwachung sowie das Prüfen auf Veränderung von Sollwerten und Statussignalen. Signalbasierte Methoden eignen sich aufgrund ihrer einfachen Umsetzbarkeit gut für eine Echtzeitüberwachung (online Fehlererkennung). Die Auswertungen können sowohl im Zeitbereich als auch im Frequenzbereich erfolgen.

Regeln können auf ein oder mehrere Signale angewandt werden und werden nach folgender Weise definiert: **WENN *Symptom erfüllt* DANN besteht Fehler**. Die Vorgehensweise und Beispiele werden in Kapitel 5.5.1 gezeigt. Die Residuen werden somit aus einem Vergleich von Expertenwissen oder nominalen Verhalten bestimmten Erwartungswerten und den gemessenen Signalen erzeugt. Die Schwellwerte werden ebenso aus einem Nominalverhalten oder mit Expertenwissen definiert.

Über die signalbasierte Fehlererkennung können eine Vielzahl von Problemen erkannt werden. Sie sind hervorragend dazu geeignet, einfache Überprüfungen vorzunehmen und schnell Abweichungen anzuzeigen. Viele Überprüfungen können schon auf Automatisierungs- oder Managementebene durchgeführt werden und entsprechende Meldungen können sofort an die Haustechnik weitergegeben werden. Bei Verknüpfungen mehrerer Komponenten wird die Programmierung der Routinen sehr umfangreich und unübersichtlich. Viele der Messwerte und Statussignale, die für die Überwachung notwendig wären, werden in der Regel nicht gespeichert oder gar nicht erfasst.

Für die Definition und Anpassung der Regeln ist Expertenwissen notwendig. Das Wissen über das Nominalverhalten ist implizit in der Art der Überprüfung und der gewählten Grenzwerte enthalten [32]. Bei wechselnden Arbeitspunkten müssen die Grenzwerte den jeweiligen Arbeitspunkten angepasst werden. Meist ist bei signalbasierter Fehlererkennung nur eine Überprüfung der statischen Zustände möglich, für die Betrachtung dynamischer Vorgänge ist sie oft nicht geeignet [32]. Im Allgemeinen ist bei signalbasierten Methoden nur die Fehlererkennung durchführbar, eine Identifizierung ist nicht möglich [32]. Die häufigsten Anwendungsfehler, die bei der regelbasierten Prüfung gemacht werden, sind Fehldefinitionen oder fehlerhafte Randbedingungen. Wechselnde Betriebszustände werden nicht beachtet und führen zu inkonsistenten oder gegensätzlichen Ergebnissen [7].

5.3.1.3 Modellbasierte Methoden

Bei der modellbasierten Fehlererkennung wird die Heizungsanlage oder eines ihrer Systeme als Modell erstellt und zur Fehlererkennung hinzugezogen. Die Modellbildung ist in Abschnitt 5.3.2 beschrieben. In dem Diagnosesystem ist die Dynamik des Modells und das Fehlerkriterium enthalten, siehe Abbildung 5.3-11 für die Aufteilung des Diagnosesystems in Paritätsgleichungen und Fehlerkriterium. Das dynamische Anlagenverhalten und das Zusammenspiel verschiedener Komponenten ist so überprüfbar. Das Modell soll die wichtigsten Dynamiken des (Teil-)Systems oder der Komponente wiedergeben in einer Genauigkeit, die Fehler erkennbar werden lässt. Modellbasierte Methoden sind einfacher bei der offline Überwachung anzuwenden, damit die Simulationsumgebung nicht auf den Gebäudeleittechnik (GLT)-Rechner beschränkt ist und bei der Überwachung mehrerer Anlagen wird nur eine zentrale Softwarelizenz notwendig. Häufige Fehler bei der Modellbildung sind strukturelle Fehler, bei denen der Prozess falsch oder nicht ausreichend genau abgebildet wird sowie ungenau geschätzte Parameter [7]. Es kann eine analytische Redundanz hergestellt werden, welche die in Abschnitt 5.3.1.4 beschriebene Hardwareredundanz durch Software ersetzt. Die Modelle können beispielsweise über die Wärmeleistungsbilanzen erstellt werden [41], siehe Kapitel 5.3.2.1. Fehler verändern das Eingangs- und Ausgangsverhalten des betroffenen Systems [32]. Das Erstellen und Parametrisieren von Modellen erfordert Trainingsdaten des korrekten Betriebs oder gute physikalische Kenntnisse des Prozesses.

Das zur Fehlererkennung herangezogene Residuum ist im fehlerfreien Fall Null oder nahe Null, ansonsten liegt ein Fehler vor [44]. Das Residuum ist für gewöhnlich ein Vergleich zwischen Messdaten und einem Modell für den fehlerfreien Betrieb. Dabei kann die Abweichung zwischen Messdaten und Ausgangsgrößen des Modells betrachtet werden oder die Abweichung zwischen nominalen Betriebsparametern und aus Messdaten bestimmten Betriebsparametern des Systems. Die Parameter werden dabei über eine Parameterschätzung angenähert. Der Ablauf der Parameterschätzung

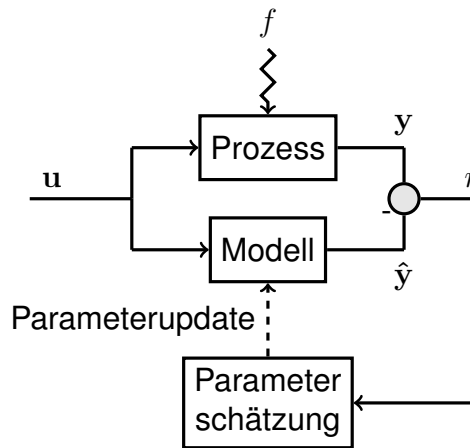


Abbildung 5.3-8: Prinzip der Parameterschätzung

ist in Abbildung 5.3-8 dargestellt. Die Ausgänge von Prozess y und Modell $\hat{y}$ werden verglichen und die Modellparameter über die Parameterschätzung so angepasst, dass die Abweichung möglichst gering ist. Bei Vorliegen eines Fehlers f wird durch die Schätzung versucht diesen möglichst gut abzubilden.

Es besteht die Möglichkeit mit Modellen virtuelle Sensoren zu erstellen, die fehlende Signale erzeugen oder für eine analytische Redundanz sorgen, auf die dann signalbasierte Verfahren angewandt werden können.

5.3.1.4 Methoden basierend auf Hardwareredundanz

Im Falle der redundanzbasierten Fehlererkennung wird ein System durch mindestens ein weiteres, redundantes System überprüft, siehe Abbildung 5.3-9. Bei einer ausreichend großen Abweichung zwischen y und $\hat{y}$, d.h. wenn das Residuum über einem Grenzwert liegt, kann davon ausgegangen werden, dass ein Fehler vorliegt. Redun-

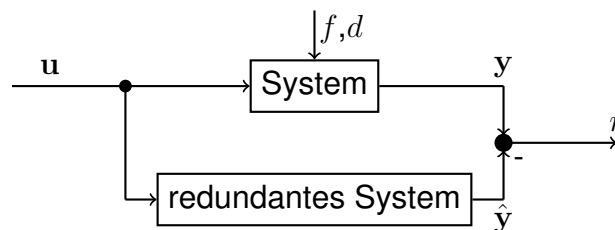


Abbildung 5.3-9: Fehlererkennung bei Hardwareredundanz

danz kann auf verschiedenen Ebenen erreicht werden, z.B. durch mehrere Sensoren, die auf unterschiedliche Art die selbe Größe messen. Auch Regler und Komponenten können redundant erstellt werden. Auch in diesem Fall wird das Residuum der Ausgänge betrachtet. Aus Kostengründen wird bei Heizungsanlagen in der Regel auf eine Hardwareredundanz verzichtet, da die zusätzlichen Kosten in keinem Verhältnis zu den möglichen Risiken stehen, anders als zum Beispiel im Flugzeugbau. Auch mehrere, gleich aufgebaute Anlagen können mit diesem Ansatz geprüft werden. Basierend auf der Annahme, dass die Anlagen grundsätzlich fehlerfrei funktionieren, können die Betriebsdaten der unterschiedlichen Anlagen miteinander verglichen werden, und bei Ausreißern die betreffenden Anlagen genauer geprüft werden. Im Bereich der Wärmeerzeugungsanlagen ist dieser Ansatz selten zielführend, da sie individuell geplant

und errichtet werden und keine direkte Vergleichbarkeit gegeben ist. Die analytische Redundanz wird den modellbasierten Methoden zugerechnet.

5.3.1.5 Paritätsgleichungen

Eine Möglichkeit der Residuengenerierung stellt die Verwendung so genannter Paritätsgleichungen dar. Dies ist eine Methode um Unstimmigkeiten zwischen Messergebnissen von Prozessen und dem in Modellen gespeicherten Nominalverhalten zu erkennen. Die Fehlererkennung mit Paritätsgleichungen lässt sich gut mit dem Zustandsraummodell (vorgestellt in Abschnitt 5.3.2.2) kombinieren, da die in den Matrizen des Modells gespeicherte Dynamik direkt in die zur Prüfung verwendeten Gleichung eingeht. Ein wichtiger Vorteil von den Paritätsgleichungen ist, dass keine Startwerte für den Zustandsvektor x benötigt werden, die Auswertung hängt nicht von dem Anfangszustand des Modells ab wie bei anderen Ansätzen, z.B. beobachterbasierten Ansätzen, die zu identischen oder gleichwertigen Ergebnissen führen, aber in der Regel komplexer zu handhaben sind [14].

Paritätsgleichungen vergleichen die Eingangsgrößen u und die Ausgangsgrößen y mit dem Nominalverhalten des Systems, wie in Abbildung 5.3-10 dargestellt. Im fehlerfreien Zustand ist das Ergebnis ein Wert nahe Null. In diesem Abschnitt gezeigt, wie die Methode für Paritätsgleichungen bezogen auf zeitdiskrete Zustandsraummodelle angewandt werden kann.

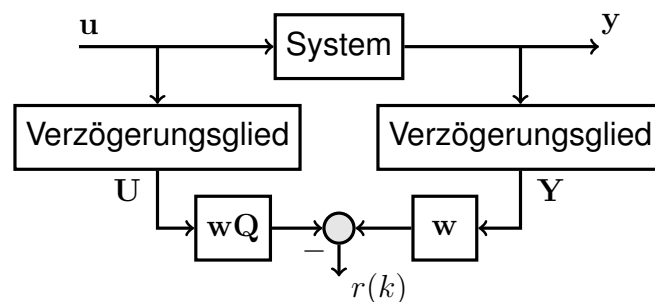


Abbildung 5.3-10: Paritätsgleichung

Die Verzögerungsglieder speichern von den Eingangsgrößen u und den Ausgangsgrößen y die Werte der letzten $q + 1$ Zeitschritte und geben diese als Matrix U (5.3.1) bzw. Matrix Y (5.3.2) aus.

$$U(k) = \begin{pmatrix} u(k-q) \\ u(k-q+1) \\ u(k-q+2) \\ \vdots \\ u(k) \end{pmatrix} \quad (5.3.1)$$

$$Y(k) = \begin{pmatrix} y(k-q) \\ y(k-q+1) \\ y(k-q+2) \\ \vdots \\ y(k) \end{pmatrix} \quad (5.3.2)$$

Das Residuum r zum Zeitpunkt k für $q + 1$ Zeitschritte wird berechnet durch

$$\mathbf{r}(k) = \mathbf{w}\mathbf{Y}(k) - \mathbf{w}\mathbf{Q}(q)\mathbf{U}(k) \quad (5.3.3)$$

mit

$$\mathbf{Q}(q) = \begin{pmatrix} \mathbf{D} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \mathbf{CB} & \mathbf{D} & 0 & \dots & 0 \\ \mathbf{CAB} & \mathbf{CB} & \mathbf{D} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{CA}^{q-1}\mathbf{B} & \mathbf{CA}^{q-2}\mathbf{B} & \mathbf{CA}^{q-3}\mathbf{B} & \dots & \mathbf{D} \end{pmatrix}. \quad (5.3.4)$$

Die Herleitung von Gleichung (5.3.3) beschreibt Isermann in [17]. Die Matrix $\mathbf{w}$ wird bestimmt durch Lösung von

$$\mathbf{w}\mathbf{R} = 0 \quad (5.3.5)$$

mit

$$\mathbf{R}(q) = \begin{pmatrix} \mathbf{C} \\ \mathbf{CA} \\ \mathbf{CA}^2 \\ \vdots \\ \mathbf{CA}^q \end{pmatrix}. \quad (5.3.6)$$

Somit enthalten $\mathbf{w}$ und $\mathbf{Q}$ das Nominalverhalten des Zustandsraummodells. Berechnungszeit und Speichernutzung können über die Wahl der $q + 1$ Zeitschritte beeinflusst werden. Die Lösung für (5.3.5) ist nicht eindeutig. Die Trivillösung $\mathbf{w} = 0$ darf nicht gewählt werden. Durch die Wahl von $\mathbf{w}$ werden die Eigenschaften der Fehlererkennung beeinflusst. Die Anzahl der Zeilen in $\mathbf{w}$ ist gleichbedeutend mit der Anzahl der Residuen im Vektor $\mathbf{r}$. Das Fehlersignal e für *ein* Residuum r , bei dem 0 'kein Fehler'

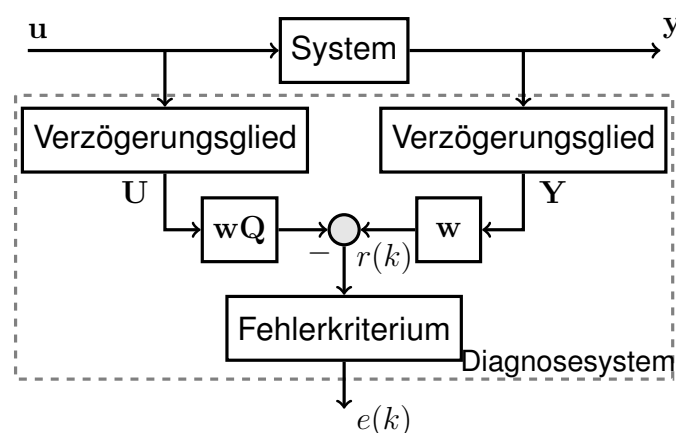


Abbildung 5.3-11: Diagnosesystem

und 1 'Fehler' bedeutet wird berechnet durch das Fehlerkriterium

$$e(k) = \begin{cases} 0 & \text{wenn } r(k) \in [b_l, b_u] \\ 1 & \text{sonst} \end{cases}. \quad (5.3.7)$$

Die obere und untere Fehlergrenzen werden dabei mit b_u und b_l bezeichnet. In Abbildung 5.3-11 ist der Prozess der Fehlererkennung mittels Paritätsgleichungen und dem Fehlerkriterium dargestellt.

Im Idealfall werden die Residuen nur von auftretenden Fehlern beeinflusst. Durch Modellierungsfehler, unbekannten Eingangsgrößen oder Störgrößen kommt es zur Streuung der Residuen und die Schwellenwerte müssen weiter gewählt werden. Es gibt verschiedene Ansätze zur Generierung von verbesserten Residuen und verbesserter Fehlererdiagnose [17]. Bei mehreren Ausgangsgrößen können mehrere Residuen gebildet werden, die jeweils von einer Ausgangsgröße abhängig sind und so eine Identifikation von Fehlern durch Kodierung im Fehlersignal e ermöglichen [44].

5.3.2 Modellbildung

Dieser Abschnitt zeigt das Vorgehen bei der Modellbildung mit vereinfachten physikalischen Modellen und Zustandsraummodellen.

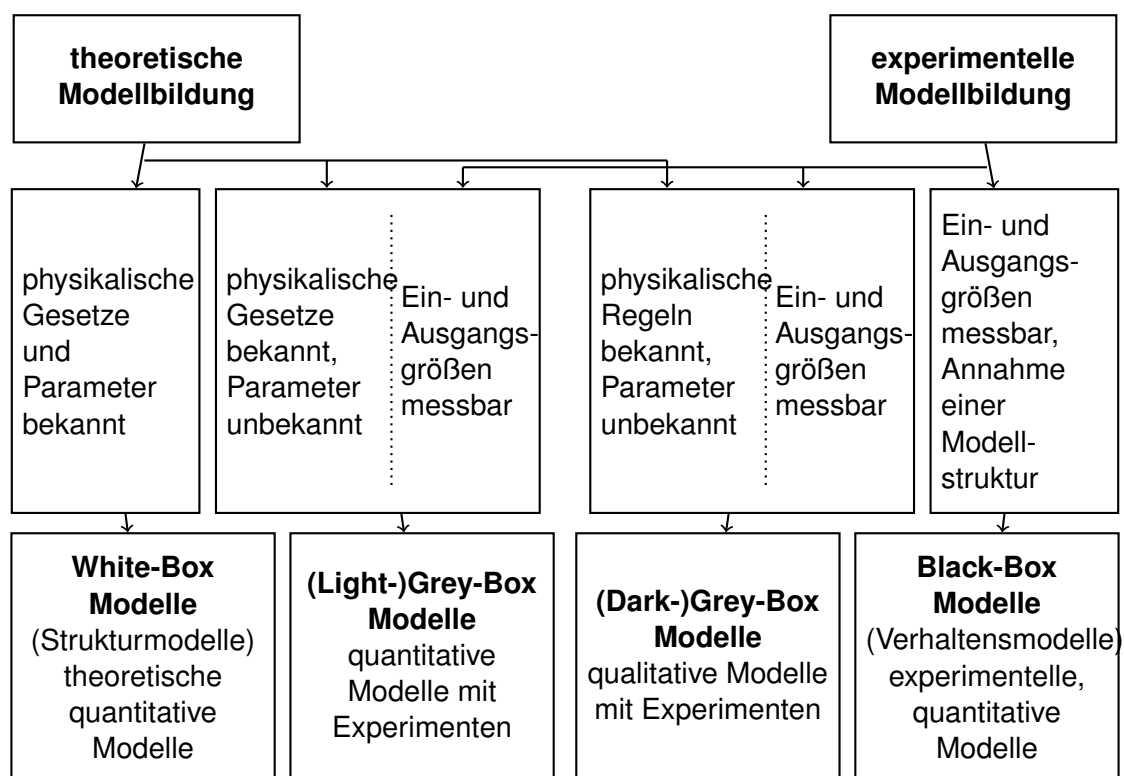


Abbildung 5.3-12: Strukturen für Prozessmodelle [17]

Für die Detaillierung von Modellen gibt es unterschiedliche Ansätze und Möglichkeiten, siehe Abbildung 5.3-12. Bei *White-Box*-Modellen, auch Strukturmodellen genannt, ist der zu modellierende Prozess im Detail bekannt und wird genau abgebildet. Es erfolgt eine analytische Beschreibung beispielsweise durch physikalische Gesetze und das Ergebnis einer theoretischen Modellbildung. Im Gegensatz dazu ist bei *Black-Box*-Modellen, auch Verhaltensmodelle genannt, der physikalische Prozess unbekannt, das Nominalverhalten kann jedoch aus Messungen ermittelt werden. Ohne auf die eigentlichen Vorgänge einzugehen wird nur dieses Ein- Ausgangsverhalten in deskriptiver Weise abgebildet. Es ist meist eine Approximation und das Ergebnis einer experimentellen Modellbildung. In Abschnitt 5.3.2.2 wird das Zustandsraummodell eingeführt,

welches auf diesem Ansatz beruht. Zwischen White- und Black-Box gibt es Zwischenstufen (Gray-Box-Modelle), bei denen die physikalischen Prozesse in ihrer Struktur abgebildet werden, die Parameter jedoch aus Messwerten identifiziert werden. Im folgenden werden zunächst thermische Modelle mit Gray-Box-Ansätzen beschreiben.

5.3.2.1 Physikalische, thermische Modelle

Die Modellierung eines White-Box Modells ist für Systeme oder Teilsysteme einer Heizungsanlage mit einem großem Aufwand verbunden und häufig nicht möglich, da Informationen zu dem Anlagenaufbau fehlen. Vereinfachte Modelle in einem Grey-Box Ansatz hingegen sind sinnvoll anwendbar, wenn ihr Detailgrad angemessen zur Aufgabenstellung und verfügbaren Datenlage gewählt wird. Wärmeleistungsbilanzen umfassen bei den Anwendungsfällen dieses Berichts den Hauptteil der physikalischen Modellierung, da Komponenten und Teilsysteme der Wärmeversorgung abgebildet werden sollen. Nur die thermische Betrachtung ist bei diesem Ansatz von Bedeutung, da andere Energieformen wie Lageenergie oder kinetische Energie als vernachlässigbar angekommen werden. Die Einschränkungen - beispielsweise kann die Produktion der elektrischen Energie eines BHKWs so nicht betrachtet werden - werden akzeptiert, da dieser Ansatz eine große Anzahl von Komponenten in einfacher Näherung gut beschreiben kann. Die Wärmebilanz

$$\sum_{n=0}^N \dot{Q}_n = 0 \quad (5.3.8)$$

besagt, dass die Summe der N zugeführten und abgeführten Leistungen Null ergeben muss. In die Bilanz gehen dabei mit positiven Vorzeichen die zugeführten, und mit negativen Vorzeichen die abgeführten Leistungen ein.

Die Wärmeleistung $\dot{Q}$ ergibt sich aus der zeitlichen Änderung der Wärmeenergie Q

$$Q = c\rho VT \quad (5.3.9)$$

$$\dot{Q} = c\rho\dot{V}T + c\rho V\dot{T}, \quad (5.3.10)$$

hierbei ist c die spezifische Wärmekapazität und ρ die Dichte des Mediums [27], Q entspricht der gesamten in dem Volumen V bei der Temperatur T gespeicherten kinetischen Energie (Wärmebewegung). In Abhängigkeit von der Position für welche die Wärmeleistungsbilanz berechnet werden soll, kann die Temperatur oder das Volumen als zeitlich konstant angenommen werden und die Ableitung für $\dot{Q}$ bzw. $\dot{T}$ in Gleichung (5.3.10) wird zu Null:

$$\dot{Q} = \begin{cases} c\rho\dot{V}T & \text{für } T = \text{const} \\ c\rho V\dot{T} & \text{für } V = \text{const.} \end{cases} \quad (5.3.11)$$

Für einen Wärmeerzeuger, wie dem in Abbildung 5.3-13 dargestellten Gaskessel, ergibt sich somit die folgende Wärmebilanz zum Zeitpunkt t , die das dynamische Verhalten vereinfacht aber ausreichend beschreibt:

$$\dot{Q}(t) = \dot{Q}_{RL}(t) - \dot{Q}_{VL}(t) + \dot{Q}_{in}(t) \quad (5.3.12)$$

$$c_w\rho V_K\dot{T}_{VL}(t) = c_w\rho\dot{V}(t)(T_{RL}(t) - T_{VL}(t)) + \dot{Q}_{in}(t) \quad (5.3.13)$$

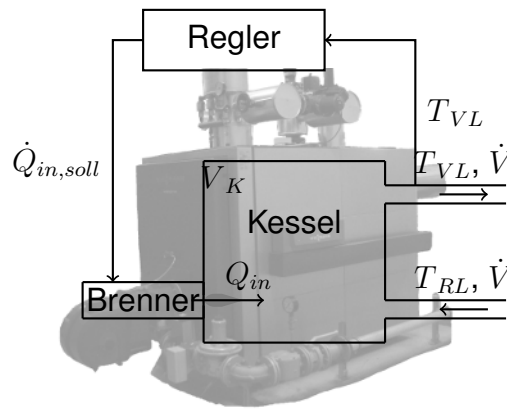


Abbildung 5.3-13: Schema Gaskessel [41]

Für die Kombination n verschiedener Komponenten, z.B. die Modellbildung einer Mehrkesselanlage oder die Verknüpfung mehrerer Verbraucher, müssen die Volumenströme $\dot{V}_n$ betrachtet werden. Sie können zusammengeführt, d.h. addiert werden

$$\dot{V}_{ges} = \dot{V}_1 + \dot{V}_2 + \dots + \dot{V}_n \quad (5.3.14)$$

und die resultierende Mischtemperatur T_{ges} dieser zusammengeführten Volumenströme wird wie folgt errechnet:

$$T_{ges} = \frac{T_1 \dot{V}_1 + T_2 \dot{V}_2 + \dots + T_n \dot{V}_n}{\dot{V}_1 + \dot{V}_2 + \dots + \dot{V}_n}. \quad (5.3.15)$$

Im Umfeld der BMWi-Forschungsprojekte ModQS und OBSERVE wurde die MATLAB HeatLib, eine SIMULINK Blockbibliothek entwickelt und in [27] dokumentiert. Sie soll die Modellierung des Verhaltens von Heizungsanlagen in Nicht-Wohngebäuden ermöglichen. In ihr sind verschiedene charakteristische Komponenten von Heizungen enthalten, aus denen sich Modelle großer, komplexer Heizungsanlagen erstellen lassen. Die Modelle bilden die Wirklichkeit vereinfacht ab, es werden Näherungen verwendet, die das dynamische Verhalten ausreichend genau beschreiben. Die Grundlage für die Modellierung der Komponenten bilden deren Wärmeleistungsbilanzen unter Berücksichtigung des Energieerhaltungssatzes. Auf diese Blockbibliothek wird bei der Modellbildung in SIMULINK nach Möglichkeit zurückgegriffen und bei Bedarf werden weitere Komponenten oder Teilsysteme nach den oben angegebenen Formeln ergänzt.

Auch für Verbraucher können anhand der Wärmeleistungsbilanzen vereinfachte Modelle erstellt werden. Im folgenden wird ein Gebäudemodell definiert, welches über drei Massen verfügt, siehe Abbildung 5.3-14. Über einen Heizkörper wird Wärme in einen Raum eingebracht. Die Wärme wird über das Gebäude an die Umgebung abgegeben. Bei geöffnetem Fenster wird die Wärme des Raumes direkt an die Umgebung abgegeben.

$$c_W \rho_W V_{HK} \dot{T}_{HK} = c_W \rho_W \dot{V}_{HK} (T_{VL} - T_{RL}) - k_{HK,R} (T_{HK} - T_R) \quad (5.3.16)$$

$$C_R \dot{T}_R = k_{HK,R} (T_{HK} - T_R) - k_{R,G} (T_R - T_G) - k_{R,A} (T_R - T_A) \quad (5.3.17)$$

$$C_G \dot{T}_G = k_{R,G} (T_R - T_G) - k_{G,A} (T_G - T_A) \quad (5.3.18)$$

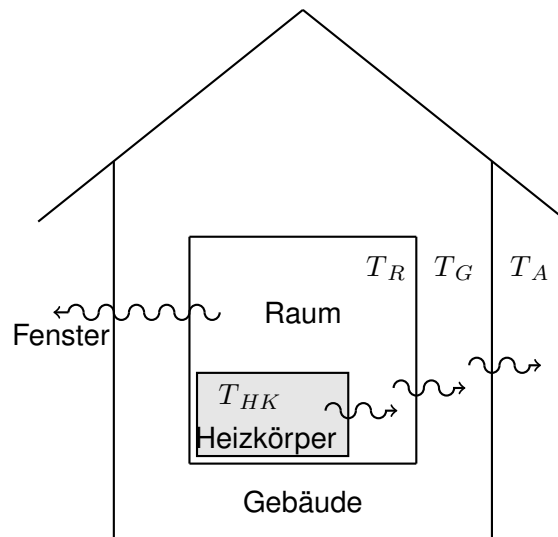


Abbildung 5.3-14: Vereinfachtes Gebäudemodell

In den Gleichungen (5.3.16) bis (5.3.18) wird die Wärmeleistungsbilanz beschrieben. Hierbei bezeichnet T_{VL} die Vorlauftemperatur, T_A die Außentemperatur, $\dot{V}_{HK}$ den Volumenstrom durch den Heizkörper, $k_{HK,R}$ den Übergangskoeffizienten von Heizung an den Raum und $k_{R,G}$ den von dem Raum an das Gebäude. Die Wärmekapazität des Raumes wird mit C_R bezeichnet, die spezifische Wärmekapazität von Wasser mit c_W , die Dichte mit ρ_W , das Heizkörpervolumen mit V_{HK} und die Rücklauftemperatur mit T_{RL} . Der Übergangskoeffizient vom Gebäude nach Außen ist $k_{G,A}$, die Wärmekapazität des Gebäudes ist C_G . Der Übergangskoeffizient $k_{R,A}$ beschreibt den Einfluss eines geöffneten Fensters. Die Heizkörpertemperatur T_{HK} wird vereinfacht aus dem Mittelwert der Vor- und Rücklauftemperatur bestimmt:

$$T_{HK} = \frac{(T_{VL} + T_{RL})}{2}. \quad (5.3.19)$$

Dieses Modell ist in der Lage, einen Raumtemperaturverlauf mit Absenkbetrieb und Trägheiten des Heizkörpers, des Raumes und des Gebäudes abzubilden. Die Möglichkeit ein geöffnetes Fenster zu betrachten wurde implementiert. Störgrößen wie innere Wärmequellen oder solare Einstrahlung werden nicht betrachtet, da für sie üblicherweise keine Messdaten vorliegen.

5.3.2.2 Zustandsraummodell

In diesem Abschnitt wird ein Ansatz für Black-Box-Modellierung dargestellt. Abbildung 5.3-15 zeigt das Schema eines linearen, zeitdiskreten Zustandsraummodells. Zustandsraummodelle sind eine Standarddarstellung für Modelle von dynamischen Systemen [33]. Ein Zustandsraummodell besteht aus einer Menge von n Differentialgleichungen 1. Ordnung, n beschreibt dabei die Ordnung des Zustandsraummodells, welche der Anzahl der Zustände abgelegt im Vektor x entspricht. Es beschreibt den dynamischen Zusammenhang zwischen der Eingangsgröße u und der Ausgangsgröße y zum Zeitpunkt k .

Auch bei Systemen mit mehreren Ein- und Ausgangsgrößen ermöglicht es es eine kompakte Beschreibung. Es ist ingenieurtechnisch gut interpretierbar und eignet sich

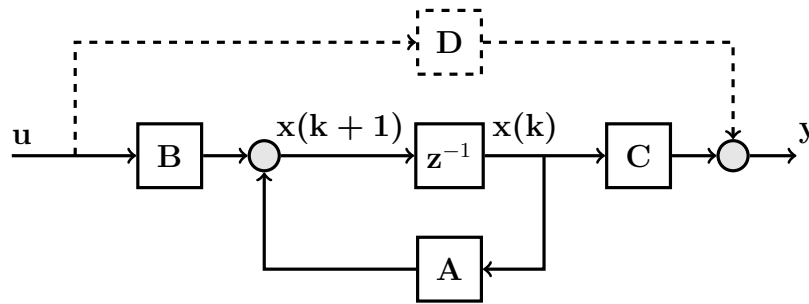


Abbildung 5.3-15: Lineares, zeitdiskretes Zustandsraummodell

gut zur rechnergestützten Verarbeitung.

$$\mathbf{x}(k+1) = \mathbf{A}\mathbf{x}(k) + \mathbf{B}\mathbf{u}(k), \quad \mathbf{x}(0) = \mathbf{x}_0 \quad (5.3.20)$$

$$\mathbf{y}(k) = \mathbf{C}\mathbf{x}(k) + \mathbf{D}\mathbf{u}(k) \quad (5.3.21)$$

Da hier mit Betriebsdaten gearbeitet wird, die in einem festen Zeitraster vorliegen - siehe Abschnitt 5.4.1 - wird das Zustandsraummodell in seiner zeitdiskreten Form mit der Zustandsgleichung (5.3.20) und der Ausgabegleichung (5.3.21) [33] verwendet. Der Startwert für $\mathbf{x}$ ist $\mathbf{x}_0$. Die Systemmatrix $\mathbf{A}$ beschreibt, wie der aktuelle Zustand den folgenden beeinflusst, d.h. $\mathbf{A}$ zeigt das Systemverhalten ohne äußere Einwirkungen. Die Steuermatrix $\mathbf{B}$ beschreibt, wie die Eingangsgrößen den Zustand beeinflussen. Die Beobachtungsmatrix $\mathbf{C}$ beschreibt den Zusammenhang von Zustand und Ausgangsgröße. Die Durchgangsmatrix $\mathbf{D}$ beschreibt den Einfluss, den die Eingangsgrößen direkt auf die Ausgangsgrößen haben. Die Wahl der Ordnung n wird in der Regel nach der Anzahl der Speicherelemente - im Gebäudebereich beispielsweise Massen von Komponenten - in der Strecke getroffen. Bei der Erstellung eines Black-Box Modells sind die Zustände physikalisch nicht mehr interpretierbar.

Systeme oder Teilsysteme in Heizungsanlagen sind in der Regel nichtlinear. Um Methoden und Algorithmen für lineare Systeme nutzen zu können, können nichtlineare Systeme durch lineare Systeme approximiert werden. Dafür wird das Systemverhalten um einen Arbeitspunkt betrachtet, und dort als linear angenommen. Diese Approximation ist damit nicht für das ganze System, sondern nur für den dazugehörigen Betriebsmodus und in dem Bereich um den Arbeitspunkt gültig. Für das linearisierte Modell werden die Ein- und Ausgänge relativ zum Arbeitspunkt angegeben. Des weiteren muss darauf geachtet werden, dass Einheit die für die Zeit sinnvoll gewählt ist, für Heizungsanlagen können Sekunden- oder Minutenschritte betrachtet werden. Die Ein- und Ausgangsgrößen müssen sich in der gleichen Größenordnung befinden [33]. Dies kann beispielsweise über die Normierung um Null mit der maximalen Auslenkung von eins erreicht werden.

Für die Black-Box Identifikation der Systemparameter steht in der *System Identification Toolbox* von MATLAB der N4SID Algorithmus [31] zur Verfügung. Aus den Ein- und Ausgangsgrößen sowie der gewünschten Ordnung berechnet dieser die Parameter. Mit Angabe einer Zeitschrittweite kann direkt ein zeitdiskretes lineares Zustandsraummodell ausgegeben werden. Weitere Optionen, beispielsweise für die Normierung der Matrizen, dem Umgang mit Störungen oder zum Verhalten des Algorithmus stehen zur Verfügung. Der Befehl `ssest` erlaubt einen tiefgreifenderen Einfluss auf die Black-Box-Identifikation, so ist es möglich, die Struktur der Matrizen und den Wert oder Wertebereich einzelner Elemente vorzugeben.

5.3.3 Tensoren und Tensorzerlegung

Nachfolgend wird gezeigt, wie Tensoren definiert werden und wie die Tensorzerlegung erfolgt. Die Grundlagen hierfür liefern Cichocki et al. [5] und Kolda et al. [26]. Sie werden von Müller et al. in [35] zusammengefasst. An dieser Veröffentlichung orientiert sich die Einführung von Tensoren und Tensorzerlegung. Tensoren bzw. die Tensorzerlegung werden unter anderem genutzt zur Datenreduktion, zur Signalverarbeitung oder zum Data-Mining [26]. Die Kapitel 5.5 und 5.6 zeigen Anwendungsmöglichkeiten der Tensorzerlegung für die Fehlererkennung bei Heizungsanlagen. Hierbei sind die Aspekte der Datenreduktion nicht von primärem Interesse sondern die Nutzung der Datenstruktur und die Interpretation der resultierenden Faktormatrizen.

Ein Tensor der Ordnung n

$$\mathbf{X} \in \mathbb{R}^{I_1 \times I_2 \times \dots \times I_n} \quad (5.3.22)$$

ist ein n -dimensionales Array. Elemente $x(i_1, i_2, \dots, i_n)$ werden mit $i_j \in \{1, 2, \dots, I_j\}$ in jeder Dimension $j = 1, 2, \dots, n$ referenziert. Für eine vereinfachte Schreibweise wird der Indexvektor

$$\mathbf{I} = (i_1, i_2, \dots, i_n) \quad (5.3.23)$$

eingeführt. Ein Tensor erster Ordnung entspricht demnach einem Vektor und ein Tensor zweiter Ordnung einer Matrix. Ein Tensor der Ordnung drei oder größer, wird

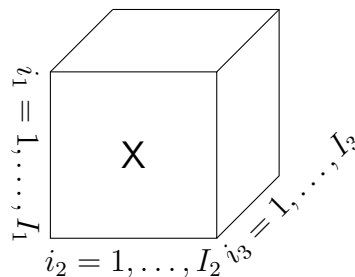


Abbildung 5.3-16: Tensor dritter Ordnung [26]

Tensor höherer Ordnung genannt. Ein Tensor dritter Ordnung $\mathbf{X} \in \mathbb{R}^{I_1 \times I_2 \times I_3}$ (Notation nach [5]) ist in Abbildung 5.3-16 [26] dargestellt. Einzelne Elemente in $\mathbf{X}$ können mit $x(i_1, i_2, i_3)$ angesprochen werden. Zeilen mit konstanten i_2 und i_3 werden mit $\mathbf{x}(:, i_2, i_3)$ referenziert, mit Doppelpunkt als Platzhalter für alle Werte $i_1 = 1, 2, \dots, I_1$. Scheiben mit konstantem i_3 werden analog dazu mit $\mathbf{X}(:, :, i_3)$ ausgedrückt.

Das *äußere Produkt*, [5],

$$\mathbf{Z} = \mathbf{X} \circ \mathbf{Y} \in \mathbb{R}^{I_1 \times I_2 \times \dots \times I_n \times J_1 \times J_2 \times \dots \times J_m} \quad (5.3.24)$$

von zwei Tensoren $\mathbf{X} \in \mathbb{R}^{I_1 \times I_2 \times \dots \times I_n}$ und $\mathbf{Y} \in \mathbb{R}^{J_1 \times J_2 \times \dots \times J_m}$ ist ein Tensor der Ordnung $n + m$ mit den Elementen

$$z(i_1, i_2, \dots, i_n, j_1, j_2, \dots, j_m) = x(i_1, i_2, \dots, i_n) y(j_1, j_2, \dots, j_m). \quad (5.3.25)$$

Das äußere Produkt ist assoziativ und kann in Sequenz angewandt werden durch

$$\bigcirc_{i=1}^N \mathbf{X}_i = \mathbf{X}_1 \circ \mathbf{X}_2 \circ \dots \circ \mathbf{X}_N. \quad (5.3.26)$$

Das äußere Produkt von zwei Tensoren erster Ordnung $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^p$ und $\mathbf{y} \in \mathbb{R}^n$, jeweils als Vektor geschrieben, ergibt einen Tensor zweiter Ordnung, welcher als Matrix dargestellt werden kann

$$\mathbf{x} \circ \mathbf{y} = \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_p \end{pmatrix} \begin{pmatrix} y_1 & \dots & y_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_1 y_1 & \dots & x_1 y_n \\ x_2 y_1 & \dots & x_2 y_n \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_p y_1 & \dots & x_p y_n \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^{p \times n}. \quad (5.3.27)$$

In Gleichung (5.3.35) wird dies an einem einfachen Zahlenbeispiel dargestellt. Ein n -dimensionaler Tensor $\mathbf{X} \in \mathbb{R}^{I_1 \times I_2 \times \dots \times I_n}$ ist ein *Rang 1 Tensor* wenn er durch das äußere Produkt von n Vektoren

$$\mathbf{X} = \bigcirc_{i=1}^n \mathbf{x}_i \quad (5.3.28)$$

mit $\mathbf{x}_i \in \mathbb{R}^{I_i \times 1}$ berechnet werden kann. Ein CP (canonical polyadic) Tensor, [5] ,

$$\mathbf{K} = [\boldsymbol{\lambda}, \mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2, \dots, \mathbf{X}_n] \in \mathbb{R}^{I_1 \times \dots \times I_n} \quad (5.3.29)$$

ist ein Tensor der Dimension $I_1 \times I_2 \times \dots \times I_n$, wobei die Elemente durch die Summen der äußeren Produkte der Spaltenvektoren von sogenannten *Faktormatrizen* $\mathbf{X}_i \in \mathbb{R}^{I_i \times I_r}$ berechnet werden. Die Gewichtung erfolgt durch die Elemente des sogenannten *Wichtungsvektor* $\boldsymbol{\lambda}$. Der Begriff CP Tensorzerlegung setzt sich zusammen aus den Namen CANDECOMP und PARAFAC und geht zurück auf Kiers [24] . Ein Element des Tensors $\mathbf{K}$ kann berechnet werden durch

$$k(i, j, \dots, p) = \sum_{k=1}^r \lambda(k) x_1(i, k) x_2(j, k) \dots x_n(p, k). \quad (5.3.30)$$

Ein CP Tensor mit dem Wichtungsvektor $\boldsymbol{\lambda}$ und den Faktormatrizen $\mathbf{X}_i \in \mathbb{R}^{I_i \times r}$ kann dargestellt werden als die Summe der äußeren Produkte

$$[\boldsymbol{\lambda}, \mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2, \dots, \mathbf{X}_n] = \sum_{k=1}^r \lambda(k) \mathbf{x}_1(:, k) \circ \mathbf{x}_2(:, k) \circ \dots \circ \mathbf{x}_n(:, k) = \sum_{k=1}^r \lambda(k) \bigcirc_{i=1}^n \mathbf{x}_i(:, k), \quad (5.3.31)$$

siehe auch Abbildung 5.3-17.

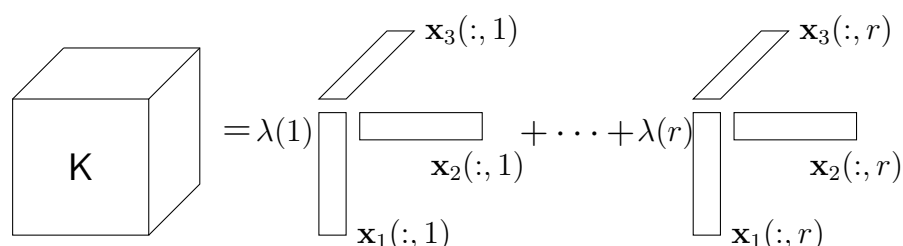


Abbildung 5.3-17: CP Tensorzerlegung

Der Rang des CP Tensors ist definiert als die minimale Anzahl r der Rang 1 Tensoren die in Gleichung (5.3.31) aufsummiert werden [6] . Durch den Wichtungsfaktor $\lambda(k)$

können die Spaltenvektoren $\mathbf{X}_i(k)$ der Faktormatrizen normiert werden. Die CP Zerlegung eines Tensors ist die exakte Darstellung des originalen Tensors durch einen CP Tensor mit dem Rang r . Ist der Rang nicht ausreichend hoch für die exakte Darstellung gewählt, wird der originale Tensor approximiert. Es gibt keinen einfachen Algorithmus, um den Rang zu bestimmen, das Problem ist NP-schwer, [26]. Es gibt verschiedene Ansätze für die ersatzweise Bestimmung des Rangs, z.B. durch schrittweise Erhöhung des Ranges, bis ein "gutes" Ergebnis erreicht wird [26]. Die CP Zerlegung eines Tensors $\mathbf{M} \in \mathbb{R}^{I_1 \times \dots \times I_n}$ wird berechnet durch Lösung des Optimierungsproblems

$$\min_{\lambda, \mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2, \dots, \mathbf{X}_n} \frac{1}{2} \|\mathbf{M} - [\lambda, \mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2, \dots, \mathbf{X}_n]\|^2, \quad (5.3.32)$$

wobei $\|\dots\|$ die Frobeniusnorm bezeichnet, [56]. Die Wahl des Ranges ist ein Kompromiss zwischen Genauigkeit der Approximation und der Anzahl der Parameter, die dafür gespeichert werden müssen. Für die Anwendungsfälle der vorliegenden Untersuchung wird nicht die Anzahl der Rang 1 Elementen verwendet, welche den Tensor exakt abbildet sondern eine Näherungslösung wird gesucht.

Um die CP Tensorzerlegung für unvollständige Tensoren, d.h. Tensoren, für die nicht alle Elemente vorhanden sind, durchzuführen, wird das Optimierungsproblem aus (5.3.32) um einen binären Observationstensor $\mathbf{G} \in \mathbb{R}^{I_1 \times I_2 \times \dots \times I_n}$ erweitert

$$\min_{\lambda, \mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2, \dots, \mathbf{X}_n} \frac{1}{2} \|\mathbf{G} \circ (\mathbf{M} - [\lambda, \mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2, \dots, \mathbf{X}_n])\|^2. \quad (5.3.33)$$

Hierbei werden in $\mathbf{G}$ die Positionen der in $\mathbf{M}$ bekannten Werten auf 1 und ansonsten auf 0 gesetzt, [56]. Auf diese Weise gehen die Positionen mit unbekannten Werten nicht in die Optimierung mit ein.

Für Anwendungen, bei denen die Einträge im Tensor ausschließlich nicht-negativ sind, kann das Optimierungsproblem aus Gleichung (5.3.32) mit der Bedingung ergänzt werden, dass die Faktormatrizen ausschließlich nicht-negative Einträge enthalten dürfen,

$$\min_{\lambda, \mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2, \dots, \mathbf{X}_n} \frac{1}{2} \|\mathbf{M} - [\lambda, \mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2, \dots, \mathbf{X}_n]\|^2, \quad (5.3.34)$$

$$\text{mit } x_i(j, k) > 0, \quad j = 1, \dots, I_i, \quad i = 1, \dots, n, \quad k = 1, \dots, r.$$

Daraus folgt eine verbesserte Interpretierbarkeit der Tensorfaktoren, wie das Anwendungsbeispiele in Abschnitt 5.5.5 zeigt. Die Wahl der Startwerte der Faktormatrizen hat Einfluss auf die Optimierung und somit ggf. auch auf das Ergebnis, sie können zufällig oder strukturiert gewählt werden [57]. Die hier gezeigten Möglichkeiten der Tensorzerlegung sind in der *Tensorlab Toolbox* für MATLAB umgesetzt.

Im folgenden soll an einem einfachen Zahlenbeispiel für Tensoren zweiter Ordnung, angelehnt an [29], die Tensorzerlegung gezeigt werden

$$\mathbf{M}^{(1)} = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 3 & 6 & 9 \\ 2 & 4 & 6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 3 \\ 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 \end{bmatrix}, \quad (5.3.35)$$

$$\mathbf{M}^{(2)} = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 3 & 6 & 9 \\ 2 & 4 & \mathbf{7} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 3 \\ 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (5.3.36)$$

$$\mathbf{M}^{(3)} = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 3 & \mathbf{7} & \mathbf{10} \\ 2 & \mathbf{6} & \mathbf{7} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 3 \\ 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}. \quad (5.3.37)$$

Im ersten Fall, Gleichung (5.3.35), kann $M^{(1)}$ über eine Zerlegung mit dem Rang 1 exakt ausgedrückt werden, $M^{(1)}$ hat den Rang 1. In Gleichung (5.3.36) wurde $m^{(1)}(3, 3)$ um 1 erhöht und somit wird ein weiteres Produkt benötigt um Tensor $M^{(2)}$ exakt darzustellen, $M^{(2)}$ hat den Rang 2. Für das dritte Beispiel, Gleichung (5.3.37), wurde der Subtensor $M^{(1)}(2 : 3, 2 : 3)$ manipuliert, so dass drei äußere Produkte notwendig sind um den Tensor $M^{(3)}$ zu bilden, $M^{(3)}$ hat den Rang 3.

Ist der Rang nicht ausreichend hoch für eine exakte Abbildung gewählt, so stellt die Tensorzerlegung eine Approximation des Ausgangstensors dar.

$$M^{(3)} = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 3 & 7 & 10 \\ 2 & \mathbf{6} & 7 \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} 1 \\ 3 \\ 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 3 & 7 & 10 \\ 2 & \mathbf{5} & 7 \end{bmatrix} \quad (5.3.38)$$

Gezeigt wird dies in Gleichung (5.3.38), in der Tensor $M^{(3)}$ statt mit dem Rang 3 Tensor aus Gleichung (5.3.37) mit einem Rang weniger angenähert wird und somit an der Position $(3, 2)$ nicht mehr dem Tensor $M^{(3)}$ entspricht.

Bei unvollständigen Tensoren fehlen die Informationen für einzelne Positionen. Auch diese können durch Lösung des Optimierungsproblems aus Gleichung (5.3.33) zerlegt werden. Tensor $M^{(1)}$ aus (5.3.35) wurde manipuliert, in dem vier Werte entfernt wurden:

$$M^{(4)} = \begin{bmatrix} * & 2 & 3 \\ 3 & 6 & * \\ * & * & 6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 3 \\ 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 3 & 6 & 9 \\ 2 & 4 & 6 \end{bmatrix} \quad (5.3.39)$$

Bei einer Zerlegung mit dem Rang 1 ergeben sich für die Tensoren $M^{(1)}$ und $M^{(4)}$ identische Faktormatrizen. Somit können die fehlenden Werte von $M^{(4)}$ durch die Zerlegung und Berechnung des vollständigen Tensors ermittelt werden. Dieses Vorgehen ist nur möglich, wenn die vollständige Struktur in den verbleibenden Werten gespeichert ist und wenn der Rang korrekt gewählt wird. Es ist nicht möglich, in einem Tensor 2. Ordnung eine komplette Zeile oder Spalte zu bestimmen, wenn für diese kein Wert vorliegt. Der entsprechende Wert in den Faktormatrizen hat keinen Einfluss mehr auf das Optimierungsproblem (5.3.33).

$$M^{(5)} = \begin{bmatrix} * & 2 & 3 \\ * & 6 & 9 \\ * & 4 & 6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 3 \\ 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} ? & 2 & 3 \end{bmatrix} \quad (5.3.40)$$

In Gleichung (5.3.40) ist ein Tensor 2. Ordnung mit einer komplett unbekannten Spalte dargestellt. Wie ersichtlich ist, hat die Position $x_2(1, 1)$ der Faktormatrizen keinen Einfluss auf die in Tensor $M^{(5)}$ bekannten Werte. Bei einem Tensor 3. Ordnung ist es möglich, komplett fehlende Zeilen oder Spalten zu bestimmen, wenn für diese in einer anderen Ebene Werte vorliegen, es ist allerdings nicht möglich, komplett fehlende Ebenen zurückzurechnen. Wird der Rang zu hoch gewählt, entstehen Positionen in den Faktormatrizen, die nicht über das Optimierungsproblem (5.3.33) beeinflusst werden.

$$M^{(6)} = \begin{bmatrix} * & 2 & 3 \\ 3 & 6 & 9 \\ 2 & 4 & 6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 3 \\ 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} ? \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} ? & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (5.3.41)$$

In Gleichung (5.3.41) ist der Tensor $M^{(6)}$, der einen unbekannten Eintrag hat, mit einem der möglichen Varianten eines CP Tensors vom Rang 2 dargestellt. In der Annahme, dass Tensor $M^{(6)}$ an der unbekannten Position den Wert 1 hat, ist die exakte Lösung mit einem CP Tensor vom Rang 1 möglich, siehe Gleichung (5.3.35). Durch den zusätzlichen Rang wird in (5.3.41) ein weiteres Paar Rang 1 Tensoren addiert.

$$G^{(6)} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.3.42)$$

Für die Positionen $x_1(1, 2)$ und $x_2(1, 2)$ der Faktormatrizen ist keine eindeutige Lösung bestimmbar, da dieser der Wert 0 in dem Observationstensor G (5.3.42) zugeordnet ist.

5.4 Datenkontrolle und manuelle Fehlererkennung

Dieses Kapitel behandelt Aspekte der Datenerfassung und -bereitstellung sowie die Dateneingangskontrolle um die Datengrundlage vor der Anwendung der automatisierten Erkennungsmethoden zu prüfen. Es werden die Anwendung der in Abschnitt 5.3.1.1 eingeführten manuelle Prüfung mit Expertenwissen betrachtet und Fehler genannt, die aufgrund ihrer Eigenschaften nicht sinnvoll automatisierbar erkennbar sind.

5.4.1 Raster der Datenerfassung

Daten können ereignisbasiert oder zeitkontinuierlich aufgezeichnet und abgelegt werden. Bei zeitkontinuierlichen Daten werden die Werte aller Messpunkte gleichzeitig ausgelesen und in eine Datei geschrieben. Nach einer fest definierten Wartezeit werden wieder alle Werte gelesen und abgespeichert. Bei ereignisbasierten (auch eventbasiert genannt) Daten wird für jeden Messpunkt individuell eine Toleranz definiert, ändert sich der Messwert um mehr als diese Toleranz, wird der neue Wert und der aktuelle Zeitstempel abgespeichert. Folgendes Beispiel soll der Unterschied verdeutlicht werden. In Tabelle 5.4-1 sind ereignisbasiert aufgezeichnete Daten dargestellt. In

Tabelle 5.4-1: Datenstruktur - ereignisbasiert

Messpunkt 1			Messpunkt 2			...
Datum	Uhrzeit	Wert	Datum	Uhrzeit	Wert	
01.01.2012	11:59:05	20.4	01.01.2012	12:00:54	1.23	
01.01.2012	12:03:32	21	01.01.2012	12:03:36	2.42	
01.01.2012	12:05:12	20.8	01.01.2012	12:04:11	3.55	
01.01.2012	12:09:34	20.3	01.01.2012	12:07:24	2.75	
01.01.2012	12:11:10	20	01.01.2012	12:10:33	3.8	
01.01.2012	12:15:06	20.5		⋮		
	⋮					

Tabelle 5.4-2 sind die Daten in einem festen Zeitraster abgelegt. Wenn es sich um Ta-

Tabelle 5.4-2: Datenstruktur - zeitbasiert

	MP 1	MP 2	MP 3	MP 4	MP5	MP6	...
Zeit	Wert	Wert	Wert	Wert	Wert	Wert	
12:00+01	20.7	1.38	48.1	2.1	8.3	1	
12:01+01	20.8	1.23	46.5	1.93	8.3	1	
12:02+01	20.9	1.44	46.8	2.01	8.4	1	
12:03+01	21	1.97	46.3	2.15	8.5	1	
12:04+01	21	3.31	48.2	2.14	8.7	1	
12:05+01	20.8	3.54	47.5	1.91	8.7	1	
			⋮				

gesdatensätze handelt, ist es ausreichend wenn das Datum im Dateinamen eindeutig enthalten ist. Es ist erkennbar, dass der Anteil der Daten im Vergleich zu Uhrzeit und weiteren Informationen in dem zeitbasierten Raster für diese Datenpunkte effizienter ist. Die Größe der Einsparung im Datenvolumen ist von der Zusammensetzung der Datenpunktlisten abhängig. Für Signale, die sich selten ändern, wie z.B. einige Sollwerte oder Betriebssignale, vergrößert sich das Datenvolumen bei zeitkontinuierlicher Speicherung. Eine Untersuchung der Betriebsdaten der Demonstrationsgebäude hat ergeben, dass für die vorliegenden Signalzusammensetzungen und die gewünschte Datenqualität die Speicherung in festem Zeitraster weniger Platz in Anspruch nimmt. Ein weiterer, viel genutzter Vorteil ist, dass direkt Differenzen zwischen den einzelnen Messpunkten gebildet werden können.

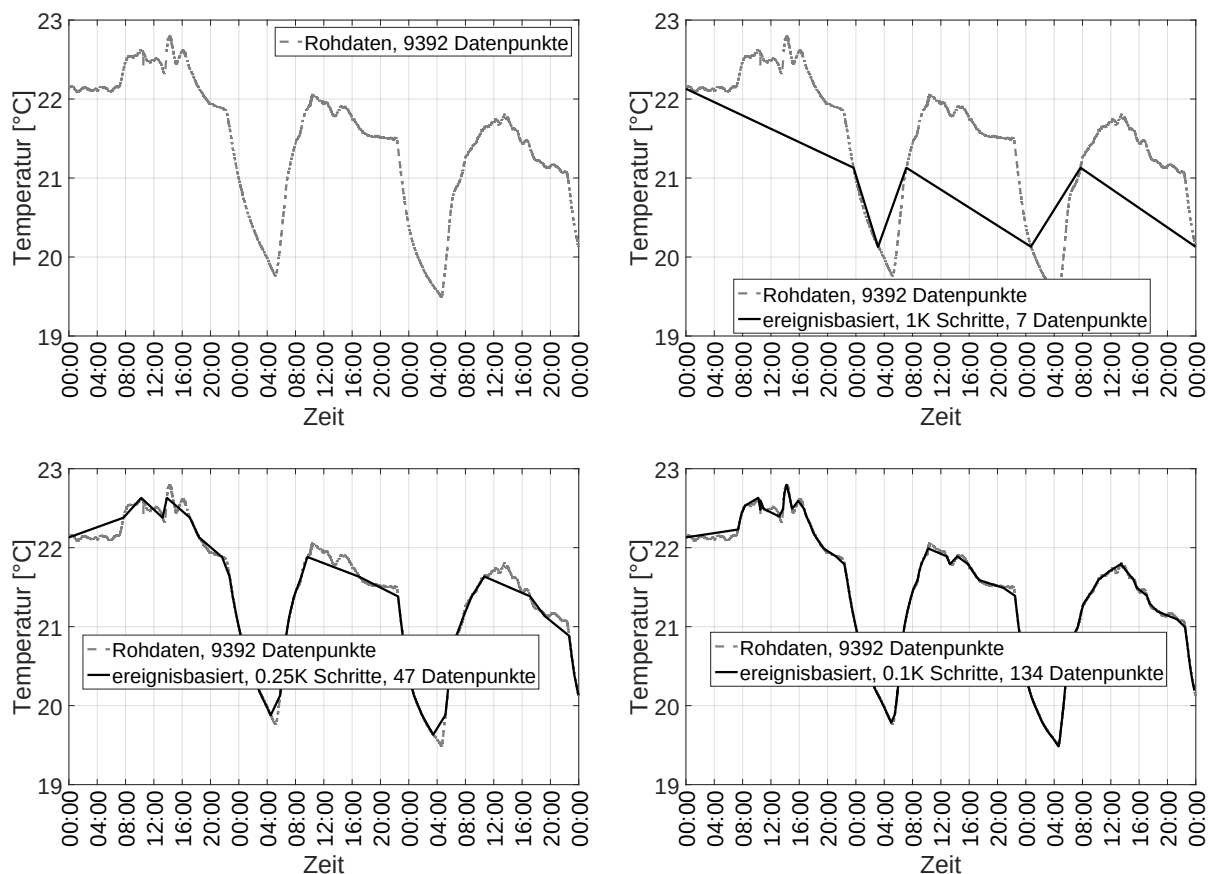


Abbildung 5.4-1: Schrittweite bei ereignisbasierter Datenerfassung - Raumtemperatur

In Abbildung 5.4-1 wird für eine Raumtemperatur die Auswirkung der Schrittweite bei ereignisbasierter Datenerfassung gezeigt. Die Daten für die Grafik oben links wurde mit der Schrittweite 0 erfasst, sie enthalten 9392 Datenpunkte für drei Tage, das bedeutet im Schnitt etwa zwei pro Minute. Der limitierende Faktor war die Geschwindigkeit der Datenerfassung und -speicherung. Wählt man eine Schrittweite von 1K, bleiben für diesen Zeitbereich sieben Datenpunkte über, das Verhalten der Raumtemperatur wird aber nicht mehr ausreichend genau abgebildet. Wählt man eine Schrittweite von 0.1K (unten rechts), so bleiben 134 Datenpunkte, das Verhalten wird relativ genau abgebildet. Je nach Auswertungszweck kann dies ausreichend sein.

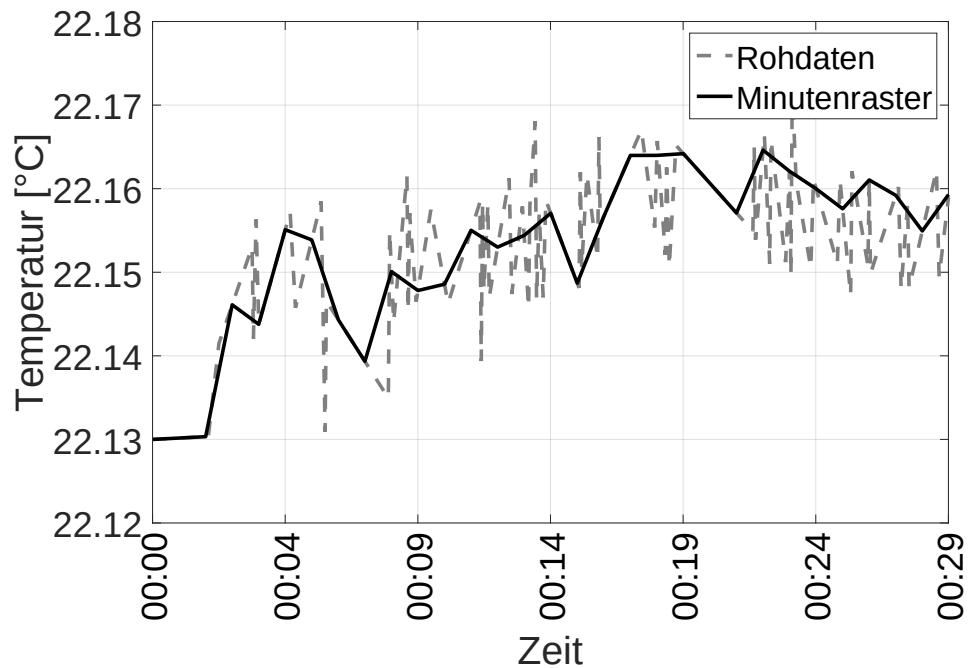


Abbildung 5.4-2: Rohdaten komprimiert zu Minutenraster, Detailansicht

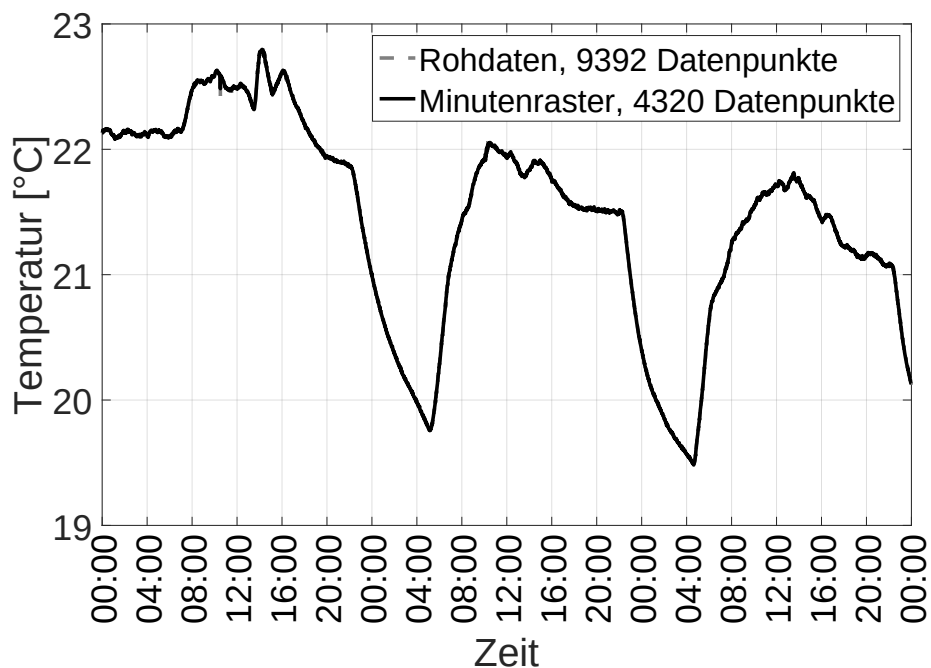


Abbildung 5.4-3: Vergleich Rohdaten mit Minutenwerten

Eine Wahl sinnvoller Größen der Schrittweiten ist demnach unumgänglich, besonders wichtig ist es darauf zu achten, dass die Schrittweite nicht kleiner gewählt wird als das Rauschen der Sensoren. Es werden sonst viele Werte aufgenommen, die keine Aussagekraft haben, siehe Abbildung 5.4-2. In drei Tagen zeichnet man bei Speicherung

von Minutenwerten 4320 Werte je Messpunkt auf. Diese bilden sehr genau den Verlauf einer Raumtemperatur ab, siehe Abbildung 5.4-3.

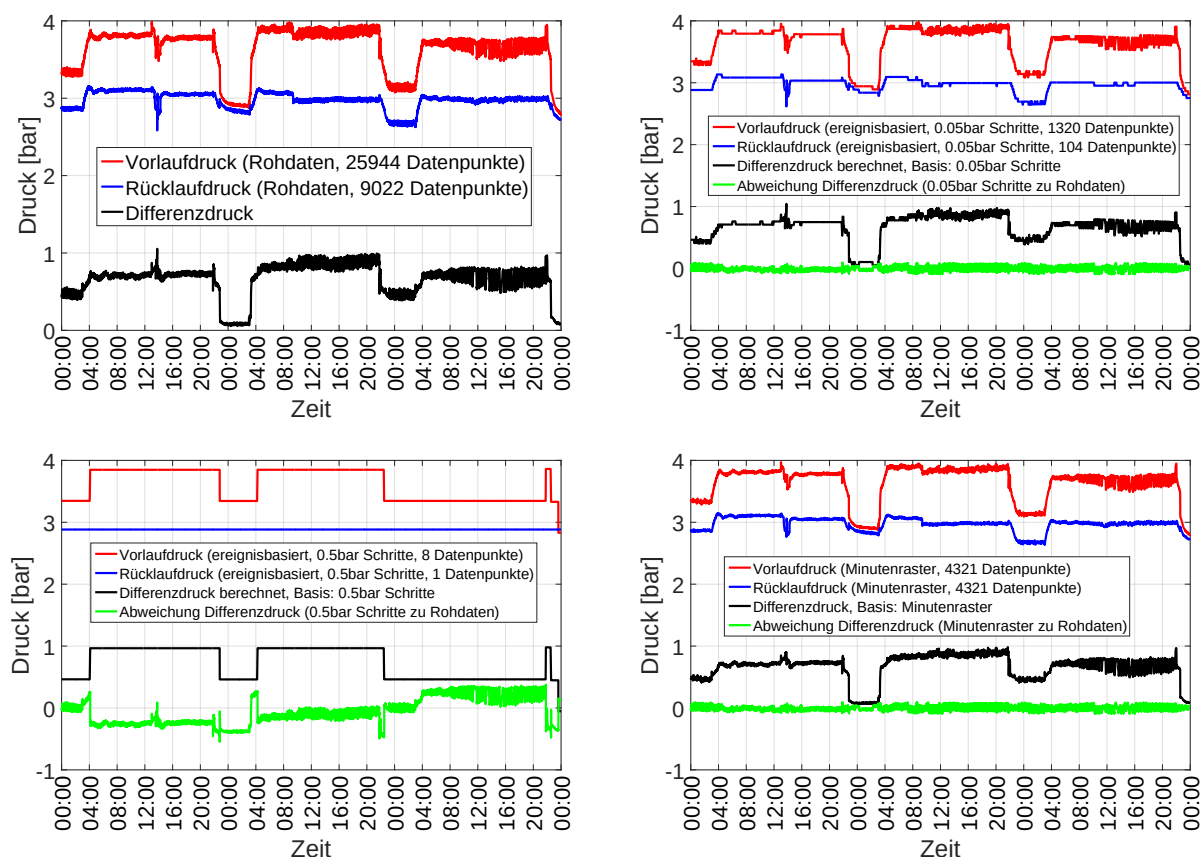


Abbildung 5.4-4: Genauigkeit und ereignisbasierte Datenerfassung - Auswirkung auf den Differenzdruck

Auch in Abbildung 5.4-4 werden die verschiedenen Raster miteinander verglichen, in diesem Fall für einen Druckmessung auf dem Verteiler und Sammler einer Heizungsanlage. Für den Vorlaufdruck konnten in den Rohdaten 25944 Datenpunkte aufgezeichnet werden, für den Rücklauf 9022. Der Differenzdruck wird berechnet für jeden Zeitpunkt, zu dem ein neuer Wert vor Vorlauf- oder Rücklaufdruck aufgezeichnet wird. Wählt man 0,05bar Schritte, so sind es noch 1320 bzw. 104 Datenpunkte, der Differenzdruck kann ausreichend genau errechnet werden. Bei 0,5bar, in der Praxis häufig gewählt, sind es nur noch 8 bzw. 1 Datenpunkte, sowohl der Druckverlauf als auch der Differenzdruck werden nicht mehr angemessen abgebildet. Das Minutenraster kann sowohl Verlauf als auch Differenz sehr gut abbilden.

In den oben genannten Beispielen werden die Daten in Minutenabständen abgespeichert. Auch größere Zeitraster sind möglich, allerdings empfiehlt es sich für viele Sensoren Daten im Minutenabstand aufzunehmen um Schwingungen und Schaltzeitpunkte ausreichend genau zu erfassen. In Abbildung 5.4-5 soll die Auswirkung verschiedener Zeitraster gezeigt werden. In der ersten Grafik ist das Modulationssignal für einen Gasbrenner dargestellt, aufgezeichnet in zwei verschiedenen Rastern. Es ist erkennbar, dass in dem größeren Raster (5 Minuten) zeitweise das Signal nicht erfasst wird, es wird mit Null angezeigt, da es nur zu den Zeitpunkten aufgezeichnet wird, an denen der Brenner ausgeschaltet ist, die Zeiträume zwischen den Aufzeichnungen sind

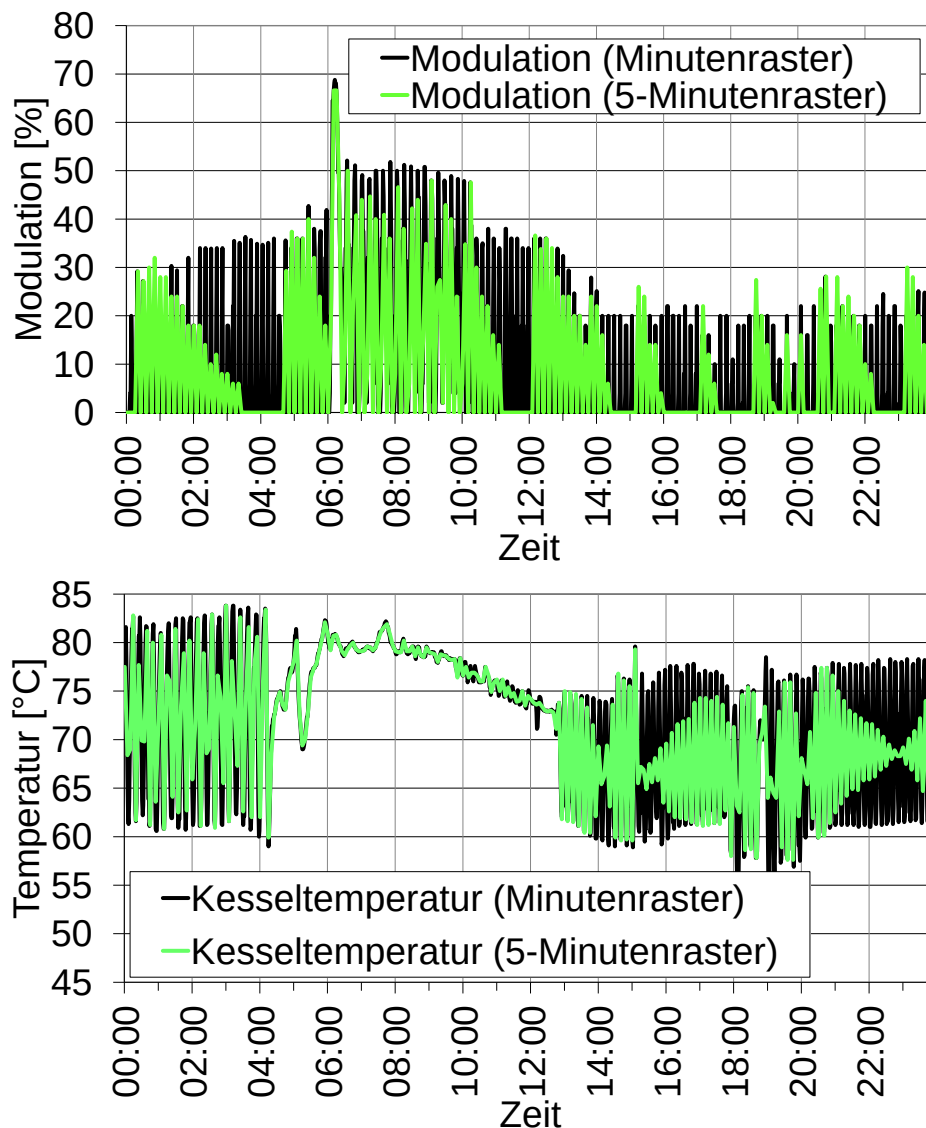


Abbildung 5.4-5: Vergleich von Minutenraster zu 5-Minutenraster

zu groß um die dazwischen stattfindenden Laufzeiten aufzuzeichnen. Auch bei der Kesseltemperatur - siehe untere Grafik - kann man sehen, dass das gröbere Raster zeitweise nicht ausreicht, um den Betrieb sicher abzubilden. Zu Zeiten, an denen die Anlage relativ stabil in Betrieb ist, reicht ein Datenpunkt alle fünf Minuten aus, um das Verhalten abzubilden, bei den schnellen Schwingungen ist dies nicht mehr der Fall. Bei der Kesseltemperatur im 5-Minutenraster werden Schwebungen beobachtet, welche ein nicht gegebenes Verhalten vortäuschen.

Somit wird für den Anwendungsfall der Fehlererkennung und Analyse des Anlagenbetriebs das Minutenraster als bevorzugte und umgesetzte Speicherart gewählt. Fehlende Werte werden mit NaN (*Not a Number*) gefüllt. Ereignisbasierte Daten werden auf das fixe Zeitraster umgerechnet. Die Ungenauigkeit, dass ein Schaltzeitpunkt maximal eine Schrittweite verzögert aufgenommen wird, wird in Kauf genommen, da der Vorteil bezogen auf das Datenvolumen und die Handhabbarkeit überwiegt. Die Genauigkeit der Messung und Datenspeicherung muss dem jeweiligen Messpunkt angemessen sein. So ist für einen Hochtemperaturheizkreis eine Rundung auf ganze Grad Celsius

in Ordnung, für die Beurteilung einer Raumtemperatur hingegen wird eine Nachkommastelle benötigt.

Tabelle 5.4-3: Fehlerliste für Dateneingangskontrolle

	Bezeichnung	Beschreibung / Beispiel
D9	Auflösung nicht angemessen	Datenqualität nicht ausreichend. Sowohl Zeitauflösung als auch ereignisbasiertes Raster können zu grob sein.

Die Prüfung auf eine mangelhafte der Wahl des Zeitrasters oder der Intervalle für die ereignisbasierte Datenerfassung muss in der Regel mit Expertenwissen erfolgen, siehe Tabelle 5.4-3, bei der Verwendung von standardisierten Datenpunktbezeichnungen, angelehnt an DIN 6779-12, kann dieser Prozess unterstützt werden, indem für die Art des Datenpunkts jeweils erwartete Zeitraster und Intervalle hinterlegt werden.

5.4.2 Datenbereitstellung / -abruf, Vorbereitung der Daten

In Kapitel 5.3 wurde herausgearbeitet, dass eine offline Fehlererkennung für die in diesem Bericht vorgestellten Methodik sinnvoll und ausreichend ist. Hierfür werden die Daten täglich abgerufen und, wie in Kapitel 5.4.1 beschrieben in einem festen Zeitraster abgelegt und mit weiteren Informationen zu den Datenpunkten verknüpft. Es erfolgt eine Dateneingangskontrolle auf Datenbankebene bei der folgendes geprüft wird:

- **Vollständigkeit**
Konnten die Daten aller Objekte abgerufen werden?
- **Vollständigkeit**
Sind alle erwarteten Spalten mit Werten gefüllt?
- **Datenausfall**
Ändern sich die Werte? Dies gilt nur für Messpunkte, die sich in 24 Stunden ändern sollen, z.B. Temperaturen. Andere Werte, beispielsweise Statusmeldungen von Pumpen, können so nicht geprüft werden.
- **Grenzwertüberschreitung**
Liegen die Daten innerhalb des erwarteten Wertebereichs?
- **Veränderung**
Wurden Sollwerte verändert? Für ausgewählte Spalten, deren Werte konstant bleiben sollen, wird im Falle der Änderung eine Meldung ausgegeben.

Im Zuge dieser Überprüfungen werden ein Teil der Sensorfehler erkannt. Die Sensorfehler lassen sich in einen Komplet- oder Teilausfall aufteilen [34]. Typische Sensorfehler für einen Teilausfall sind in Abbildung 5.4-6 dargestellt. Bei der systematischen Messabweichung hat der gemessene Wert einen Versatz vom wahren Wert. Bei der Sensordrift entfernt sich der gemessene Wert mit der Zeit immer weiter vom tatsächlichen Wert. Bei Verlust von Genauigkeit wird die Streuung größer. Weiterhin kann es

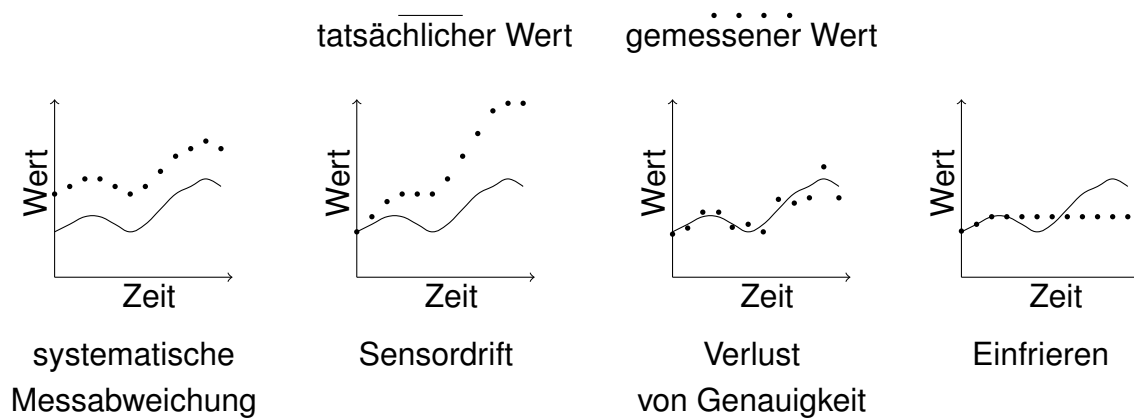


Abbildung 5.4-6: Sensorfehler [2]

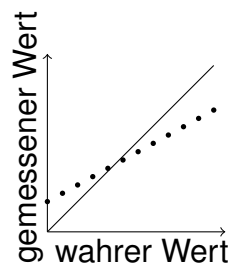


Abbildung 5.4-7: fehlerhafte Kalibrierung / Abgleich

zum Einfrieren des Wertes kommen, dann wird ein konstanter Wert ausgegeben, der nicht mehr dem tatsächlichen Wert entspricht.

Bei der Umsetzung der Spannungs- bzw. Stromsignale in die abzuspeichernden Messwerte muss auf korrekte Wertebereiche geachtet werden. Es kommt zu fehlerhaften Berechnungen auf Grund von falscher Steigung und / oder Versatz. In Abbildung 5.4-7 wird dargestellt, wie bei falscher Umrechnung die gemessenen Werte von den tatsächlichen Werten abweichen. Die durchgezogene Linie stellt in dieser Grafik die korrekte, und die gepunktete Linie die fehlerhafte Umrechnung dar.

Bei der Dateneingangskontrolle können das Einfrieren der Werte eines Sensors sowie Grenzwertverletzungen und somit eine starke Sensordrift oder ein starker Verlust der Genauigkeit festgestellt werden. Komplettausfälle werden über die Vollständigkeitskontrolle erkannt. Eine weiterreichende Erkennung ist nur bei ausreichender Redundanz, d.h. durch Vergleichsmessungen oder beispielsweise die Möglichkeit, Energiebilanzen zu erstellen, möglich. Diese Redundanz besteht aus den in Kapitel 5.3.1.4 genannten Gründen in der Regel nicht.

Die Prüfungen der Dateneingangskontrolle sind signalbasiert, sie können auch als Überprüfung von Regeln betrachtet werden. Dabei können die in Tabelle 5.4-4 genannten typischen Fehler im Bereich der Daten erkannt werden.

Tabelle 5.4-4: Fehlerliste für Dateneingangskontrolle

	Bezeichnung	Beschreibung / Beispiel
D1	Sensordefekte	Ausgefallen oder nicht plausible Werte
D7	Trenddaten werden nicht aufgezeichnet	Daten werden nicht an GLT übermittelt oder dort nicht gespeichert
D11	Rechnerdefekt	Keine Datenaufzeichnung
D12	Abbruch der Datenverbindung	Keine Datenübertragung möglich

5.4.3 Fehlererkennung mit Expertenwissen

Die manuellen Analyse der Betriebsabläufe ist zeitaufwendig und erfordert ein hohes Fachwissen. Trotzdem ist sie für Fehler, die nicht automatisiert erkannt werden können, oder deren Erkennung nicht eingerichtet ist, notwendig. Somit ist es wichtig, die Daten in einer Weise aufzubereiten und bereitzustellen, damit der Nutzer sie effektiv prüfen kann.

Um einen schnellen Überblick über den Betrieb zu bekommen, werden die Messpunkte in vordefinierten Grafiken ausgegeben, es wird an dieser Stelle auch auf den Bericht 4 des Annex 47 [1] und den Endbericht von Building EQ [20] verwiesen. **Zeitreihenplots**, ein Beispiel ist in Abbildung 5.4-8 dargestellt, bilden die Betriebsdaten über die Zeit ab. Für die verbesserte Darstellung von Datenpunkten mit unterschiedlichen Wer-

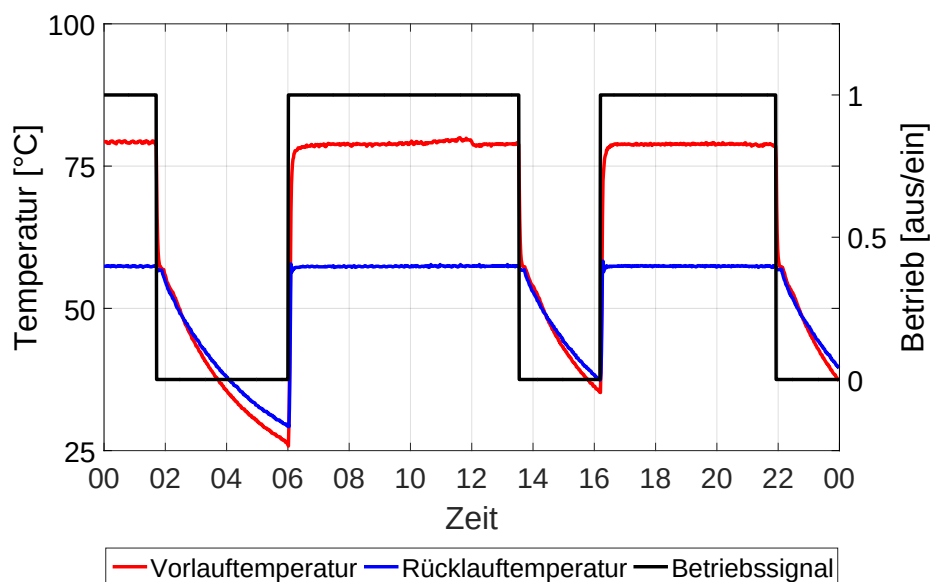


Abbildung 5.4-8: Beispiel für Zeitreihenplots

tebereichen kann eine zweite Y-Achse definiert werden. Diese Grafiken können dafür genutzt werden, um zu erkennen ob ein Prozess stabil ist und wie er sich über die Zeit entwickelt. Zeitliche Abhängigkeiten zwischen mehreren Datenpunkten können beobachtet werden, z.B. ob und wie sich eine Temperatur nach einer Änderung im Schaltsi-

gnal verändert. Auch ist es möglich schnell zu erkennen, ob die zeitliche Entwicklung mehrerer Datenpunkte parallel verläuft oder ob sie sich unterschiedlich entwickeln. Vorher-nachher-Vergleiche von Maßnahmen sind gut durchzuführen. In Abbildung 5.4-8 sind die Vor- und Rücklauftemperatur eines BHKWs sowie das dazugehörige Betriebssignal abgebildet.

In **Streudiagrammen** werden eine oder mehrere Datenpunkte über einen weiteren Datenpunkt aufgetragen, siehe Beispielgrafik 5.4-9. Am häufigsten werden Messwerte

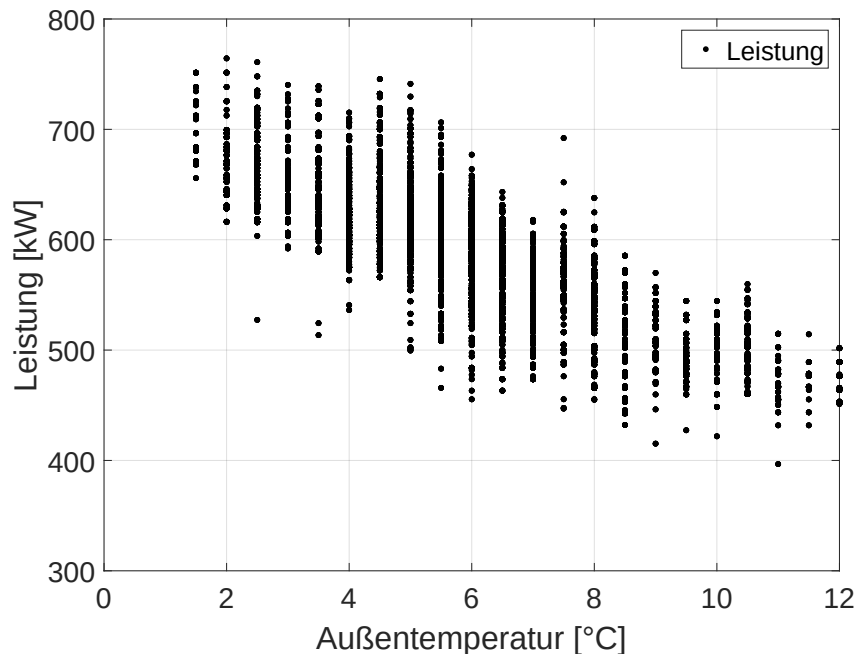


Abbildung 5.4-9: Beispiel für Streudiagramme

oder errechnete Leistungen über die Außentemperatur aufgetragen, um Heizkurven, Lastkurven und ähnliches zu bestimmen. Auch Leistungswerte oder Volumenströme werden oft als x-Achse verwendet. In der Beispielgrafik 5.4-9 ist die Wärmeleistung der Verbraucher eines Bürogebäudes über die Außentemperatur abgebildet. Sie ergibt ein relativ kompaktes Feld und eine gute direkte Korrelation zur Außentemperatur da in diesem Gebäude konstant geheizt wird und keine Absenk- oder Aufheizeffekte auftreten. Nicht nur Messwerte werden als x-Achse verwendet, es ist auch möglich die Uhrzeit als x-Achse zu nehmen, so bekommt man eine Grafik, in der tageszeitabhängige, wiederkehrende Vorkommnisse gut zu erkennen sind da es ist eine Vielzahl übereinandergelegte Zeitreihen abbildet. Beispiele für die Verwendung der Uhrzeit als x-Achse sind in Abschnitt 5.6.3 dargestellt. Es sollte jedoch geprüft werden, ob die Tageszeitabhängigkeit mit den im nächsten Absatz vorgestellten Rasterdiagrammen besser auswertbar ist.

Ein weiterer Grafiktyp sind die **Rasterdiagramme**, siehe Abbildung 5.4-10. Auf der x-Achse sind die Tage aufgetragen und auf der y-Achse die Uhrzeit. Somit ergibt sich eine Grafik, in der man gut tages- und wochentagsabhängige Muster erkennen kann. Sie können sowohl für diskrete als auch für kontinuierliche Signale verwendet werden. In Abbildung 5.4-10 ist oben das Betriebssignal für einen Heizkreis über drei Wochen aufgezeichnet, in dem die Nutzungszeit an Wochentagen von etwa 6 bis 21 Uhr eingestellt ist. Nachts wird der Heizkreis zur Absenkung der Raumtemperatur deaktiviert,

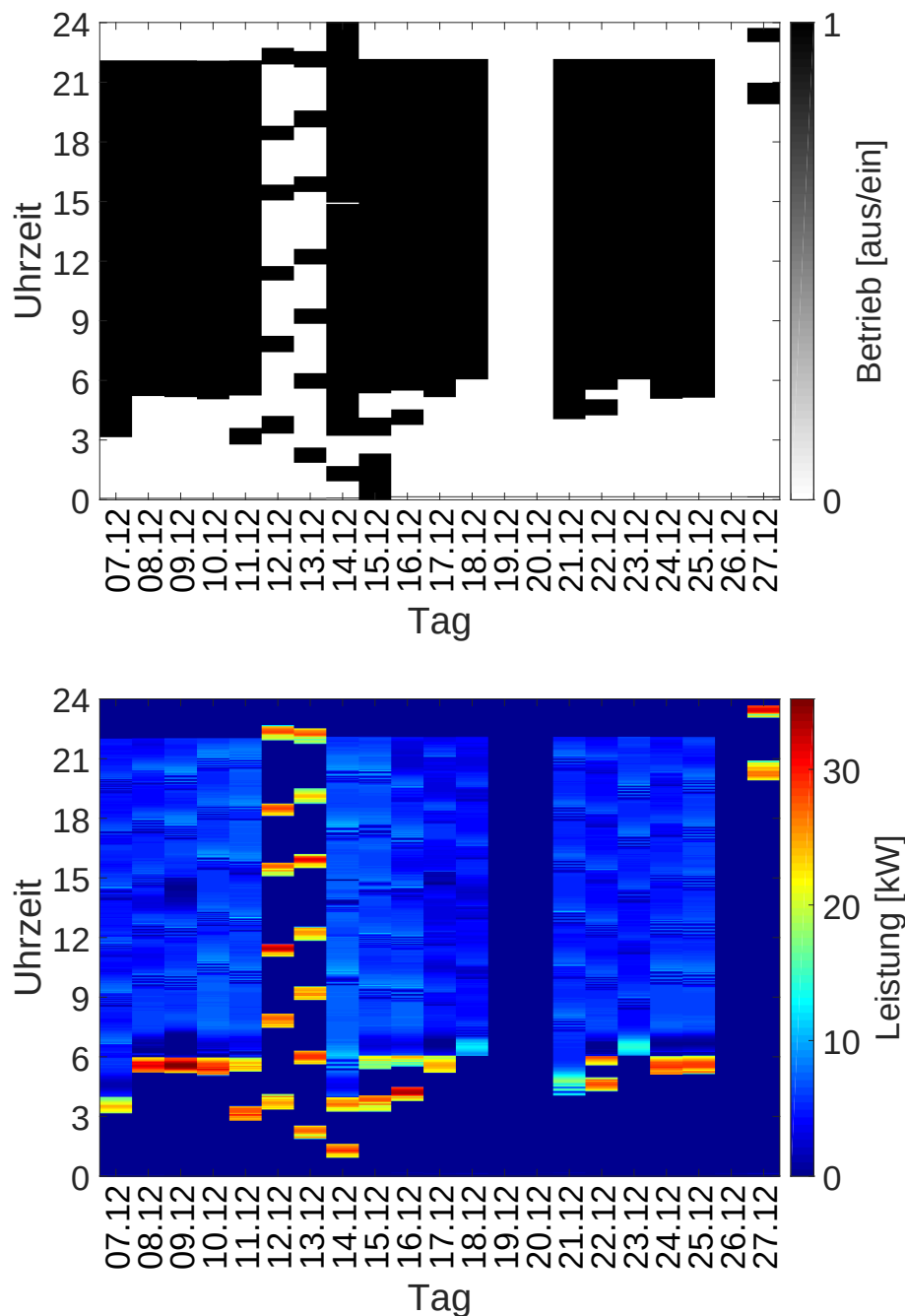


Abbildung 5.4-10: Beispiele für Rasterdiagramme

fällt die Raumtemperatur unter einen Grenzwert wird nachgeheizt. Unten ist das dazu-gehörige Leistungsprofil abgebildet.

Es ist empfehlenswert die Grafiken nach Bereichen (Wärmeerzeugung, -verteilung und -nutzung) und ggf. nach Komponenten oder Teilsystemen weiter unterteilt darzustellen. Mit der geeigneten Wahl der oben beschriebenen Grafiktypen und den prüfenswerten Messpunkten kann der Nutzer Betriebscharakteristika schnell visuell aufnehmen. Ein durchgehend verwendetes Farbschema unterstützt dies. Die Einrichtung der Grafiken muss durch einen Experten oder Fachpersonal mit entsprechenden Anlagenkenntnissen erfolgen. Es zeigt sich, dass folgende fest definierten Werte für die Länge der betrachteten Zeiträume sinnvoll sind: Tag, Woche, Monat, Jahr. Bei der Wahl von ei-

nem Tag werden alle Datenpunkte eingelesen und dargestellt, bei längeren Zeiträumen werden nur jeder x.te Datenpunkt geladen und angezeigt. Die Länge von x richtet sich nach der Grafikgröße bzw. Anzahl der verfügbaren Pixel. Das Unterdrücken von Details wird in Kauf genommen um das System leistungsfähig zu halten. Der Nutzer wird die Anzeigen nur verwenden, wenn sie ausreichend schnell bereitgestellt werden. Eine Verknüpfung mit den Schemata der Systeme ist hilfreich, da in der Regel weitere Information benötigt wird um Auffälligkeiten in den Grafiken zu bewerten. Weiterhin ist es notwendig, ein Werkzeug bereitzustellen, mit dem individuelle Grafiken erzeugt werden können, um bei Bedarf Details sichtbar zu machen oder andere Kombinationen von Messpunkten zu vergleichen.

Aus den in Anhang B genannten typischen Fehlern kann die überwiegende Zahl von einem Experten anhand der Betriebsdaten und ggf. weiterer Information erkannt werden, wenn er ausreichend in die jeweilige Anlage eingearbeitet ist. Die Prüfung mit Expertenwissen sollte aber nur für Fehler erfolgen, die nicht, nur eingeschränkt oder nur teilweise durch andere Methoden erkannt werden können.

5.5 Anwendungsbeispiele signalgestützter Methoden

In diesem Kapitel wird die Anwendung der in Kapitel 5.3.1.2 eingeführten signalgestützten Methoden an ausgewählten Praxisbeispielen gezeigt. Nach Erkennungsansatz sortiert wird genannt, für welche der in Anhang B beschriebenen Fehler er anwendbar ist. Den Schwerpunkt des Kapitels nimmt die Überprüfung von Regeln ein, gefolgt von Methoden, die benötigt werden, um grundlegende Elemente der Regeln, wie Kennwerte oder Nutzungszeiten, bestimmen zu können. Des weiteren werden Methoden gezeigt, die die Tensorzerlegung zur Fehlererkennung nutzen.

5.5.1 Regelbasierte Fehlererkennung

In Abschnitt 5.3.1.2 werden Grundlagen und Schwierigkeiten der regelbasierte Überprüfung vorgestellt. Regeln können auf ein oder mehrere Signale angewandt werden und werden nach folgender Weise definiert: **WENN *Symptom erfüllt* DANN besteht ein Fehler**. Die Formulierung des Symptom setzt sich dabei aus einem Term, d.h. einem Test, der durchgeführt werden soll, und Einschränkungen für Geltungsbereich und Zeitraum zusammen. Es ist sinnvoll zu prüfen, ob ein Fehler über eine frei definierbare Mindestanzahl von Zeitschritten vorliegt, bevor ein Fehler gemeldet wird, um Fehlalarme bei Ausreißern in der Datenerfassung oder bei kurzzeitigen Schwingungen zu unterdrücken. Die Formulierung des Symptoms muss so erfolgen, dass ihr Ergebnis bei der Überprüfung stets *wahr*, d.h. ein Fehler liegt vor, oder *falsch* ist. Die Operatoren zur Erstellung der Regel können dabei von den Grundrechenarten, logischen Verknüpfungen, Vergleichen, Bedingungen bis hin zu komplexen Funktionen wie Ableitungen reichen. Aus den in Kapitel 5.2 bzw. im Anhang B genannten typischen Fehlern wurden Fehler herausgearbeitet, welche gut mit einem regelbasierten Ansatz erkannt werden können. Im Folgenden befindet sich eine Auflistung in der die Regel dargestellt wird, die notwendige Information und Datenpunkte sowie die dazugehörigen Fehlerarten genannt werden. Die Beschreibungen sind aus real angewandten Regeln zusammengestellt, die Regeln werden in der täglichen Überprüfung von Forschungs- und Kundenobjekten angewandt. Der Aufbau der Beschreibungen ist wie folgt:

Nummer und Name der Regel

Symptom: Symptom das geprüft werden soll.

Benötigt: Für die Erstellung und Prüfung der Regel benötigte Signale und Information.

Beschreibung: Weitere Erklärungen zum Fehler.

Regel: Beispiel für die Formulierung einer Regel.

Fehlerarten: Tabelle mit Fehlern, die mit dieser Regel erkannt werden können.

Dabei ist es teilweise nicht eindeutig, welcher Fehler vorliegt, da das gleiche Symptom verschiedene Ursachen haben kann. Außerdem gibt es Fehler, die mehr als ein Symptom haben, von denen im Fehlerfall mindestens eins auftritt. Das Vorliegen eines Pumpendefekts kann beispielsweise über die Prüfung der Einhaltung von Heizkurven oder die Überwachung des dazugehörigen Differenzdrucks geprüft werden. Eine hohe Schaltheufigkeit eines Kessels in einer Mehrkesselanlage ist ein Anzeichen für eine mangelhafte Kesselfolgeschaltung. Eine mangelhafte Regelstrategie kann aber auch ohne Überschreiten des Grenzwertes der Schaltheufigkeit vorliegen, etwa wenn der Folgekessel zu spät in Betrieb genommen wird und es zu einer Unterversorgung kommt. Es ist zu beachten, dass viele Regeln nur für Komponenten gelten, die im

überprüften Zeitraum in Betrieb waren. Dies muss in der Formulierung der Symptome entsprechend ergänzt werden. An dem einfachen Beispiel der Prüfung eines Differenzdrucks eines Heizkreises wird dieses deutlich: Der Differenzdruck sollte zwischen einem unteren und oberen Grenzwert liegen, damit der Kreis angemessen versorgt wird. Befindet sich eine Heizungsanlage beispielsweise in der Sommerabschaltung, besteht in den Heizkreisen kein Differenzdruck, da die Pumpen ausgeschaltet sind. Eine einfache Grenzwertprüfung würde einen Fehlalarm verursachen, da der untere Grenzwert unterschritten wird. Ergänzt man die Prüfung um die Bedingung, dass sie nur gilt, wenn der entsprechende Heizkreis in Betrieb ist, wird der Fehlalarm vermieden. Im Folgenden wird die Definition von 17 Regeln dargestellt. Weiterhin werden Methoden vorgestellt, mit denen Betriebszeiten oder Kennwerte bestimmt werden können, die für die Nutzung der Regeln notwendig sind.

1 - Nutzungszeiten

Symptom: Komponente in Betrieb obwohl nicht benötigt. Teilsystem nicht im Absenkbetrieb obwohl außerhalb der Nutzungszeit.

Benötigt: Soll-Nutzungszeit, Betriebssignal.

Beschreibung: Die Soll-Nutzungszeit muss aus der Anlagendokumentation oder Betriebsdaten bestimmbar sein. Es muss ein Betriebssignal vorhanden oder aus Messdaten bestimmbar sein.

Regel: WENN Lüftung Büroräume nach 20 Uhr in Betrieb DANN besteht ein Fehler

Fehlerarten:

Tabelle 5.5-1: Fehlerliste für Regel 1 - Nutzungszeiten

	Bezeichnung	Beschreibung / Beispiel
N1	Fehlende Nachtabenkung	Außerhalb der Nutzungszeiten: Raumtemperatur nicht abgesenkt
N2	Fehlende Wochenendabsenkung	Am Wochenende (für nicht genutzte Bereiche): Raumtemperatur nicht abgesenkt
N3	Fehlende Ferienabsenkung bei Schulen	In den Ferien: Raumtemperatur nicht abgesenkt
N4	Betriebszeiten Lüftung	Lüftung außerhalb der Raumnutzung in Betrieb

2 - Sommerabschaltung und Frostschutz

Diese Regel beinhaltet unter anderem die Funktionalität der Regel F08 aus [45] , die außerdem Hinweise auf die Berechnung der Heizgrenze gibt.

Symptom: Komponente in Betrieb obwohl (mittlere) Außentemperatur über $X^{\circ}\text{C}$.

Benötigt: Betriebssignal Komponente, Statussignal Frostschutz, Außentemperatur.

Beschreibung: Anwendbar für Komponenten, bei denen bekannt ist, dass sie bei festgelegten Außentemperaturen nicht in Betrieb sein dürfen. Es muss ein Betriebssignal vorhanden oder aus Messdaten (z.B. über die Auswertung eines Volumenstroms) bestimmbar sein. Es muss ein Statussignal des Frostschutzbetriebs vorhanden oder aus Messdaten bestimmbar sein.

Regel 1: WENN innerhalb der letzten 24 Stunden die mittlere Außentemperatur größer als die Heizgrenze ist und die Heizkreispumpe in Betrieb ist DANN besteht ein Fehler

Regel 2: WENN die mittlere Außentemperatur größer als 7°C ist und die Lüftungsanlage im Frostschutzmodus betrieben wird DANN besteht ein Fehler

Fehlerarten:

Tabelle 5.5-2: Fehlerliste für Regel 2 - Sommerabschaltung und Frostschutz

	Bezeichnung	Beschreibung / Beispiel
N5	Grenztemperatur Frostschutz	Frostschutztemperatur zu hoch eingestellt (deutlich über der Frostgrenze), Heizregister werden durchflossen, Pumpen in Betrieb etc.
N7	Fehlende Sommerabschaltung	Heizungsanlage auch bei Temperaturen oberhalb der Heizgrenze in Betrieb

3 - Schalthäufigkeit von Komponenten, Maximalwert / Maximalwert

Symptom 1: Komponente hat über X Anzahl von Schaltvorgängen pro Tag oder Woche. Ggf. Randbedingungen wie Sommerbetrieb berücksichtigen.

Symptom 2: Komponente hat unter X Anzahl von Schaltvorgängen pro Tag oder Woche. Ggf. Randbedingungen wie Sommerbetrieb berücksichtigen.

Benötigt: Betriebssignal.

Beschreibung: Eine zu hohe Anzahl von Startvorgängen deutet auf instabilen Betrieb hin. Eine zu niedrige auf Defekte oder fehlende Abschaltungen. Es muss ein Betriebssignal vorhanden oder aus Messdaten (z.B. über die Auswertung eines Volumenstroms) bestimmbar sein.

Regel 1: WENN der Gaskessel am Tag mehr als 48 Startvorgänge hat DANN besteht ein Fehler

Regel 2: WENN die Zirkulationspumpe des Warmwasserbereiters weniger als 1 Startvorgang am Tag hat DANN besteht ein Fehler

Fehlerarten:

Tabelle 5.5-3: Fehlerliste für Regel 3 - Schalthäufigkeit von Komponenten, Maximalwert / Maximalwert

	Bezeichnung	Beschreibung / Beispiel
N6	Betriebszeiten Warmwasserbereitung	Erlaubte Abschaltung von Zirkulation und Warmwasserbereitung wird nicht genutzt
A1	Regelstrategie bei mehreren Wärmeerzeugern (auch unterschiedlicher Art)	Durch mangelhafte Regelstrategie von mehreren Wärmeerzeugern kein stabiler Betrieb (häufige Startvorgänge), zeitweise Unterversorgung oder ineffiziente Betriebsweisen
A2	Kesselfolgeschaltung (Spezielle Art des Fehlers A1)	Durch mangelhafte Regelstrategie von Mehrkesselanlagen kein stabiler Betrieb (häufige Startvorgänge) oder zeitweise Unterversorgung
A12	Regelstrategie Heizen und Kühlen	Keine Umschalthysterese zwischen Heiz- und Kühlbetrieb, besonders bei trägen Systemen wie Betonkernaktivierung
S2	Regelgüte Lüftungsanlage	Zulufttemperatur der Lüftungsanlage kann nicht stabil geregelt werden. Es kommt zur Wechselwirkung zwischen Heiz- und Kühlregister. Besonders Problematisch bei Lüftungsanlagen, wenn durch Schwingung der Frostschutz ausgelöst wird
L2	Kesseltemperaturwächter	Durch eine zu niedrig eingestellte maximale Kesseltemperatur wird der Kessel zu früh abgeschaltet und es kommt zu keinem stabilen Betrieb

	Bezeichnung	Beschreibung / Beispiel
L3	Pumpen im Dauerbetrieb	Pumpen werden manuell durchgehend betrieben
L8	Brandschutzklappen ausgelöst	Lüftung außer Betrieb, da Brandschutzklappen im Zuge von Wartungen ausgelöst und nicht wieder geöffnet wurden
P9	Anti-Blockierschaltungen	Keine Anti-Blockierschaltungen programmiert, Komponenten erleiden Standschäden

4 - Mindestlaufzeiten / Mindestausschaltzeiten

Symptom 1: Komponente ist nach einem Start unter X Minuten in Betrieb.

Symptom 2: Pausenzeit einer Komponente zwischen einem Stopp- und Startvorgang ist unter X Minuten.

Benötigt: Betriebssignal.

Beschreibung: Zu kurze Laufzeiten oder Pausen deuten auf instabilen Betrieb hin. Es wird empfohlen eine Toleranz einzuplanen (beispielsweise erst bei der 2. kurzen Laufzeit pro Tag) um Fehlalarme zu vermeiden. Es muss ein Betriebssignal vorhanden oder aus Messdaten (z.B. über die Auswertung eines Volumenstroms) bestimmbar sein.

Regel 1: WENN das BHKW Laufzeiten an einem Tag zwei oder mehr Laufzeiten von unter einer Stunde hat DANN besteht ein Fehler

Regel 2: WENN das BHKW nach weniger als 30 Minuten nach dem Ausschalten wieder startet DANN besteht ein Fehler

Fehlerarten:

Tabelle 5.5-4: Fehlerliste für Regel 4 - *Mindestlaufzeiten / Mindestausschaltzeiten*

	Bezeichnung	Beschreibung / Beispiel
A1	Regelstrategie bei mehreren Wärmeerzeugern (auch unterschiedlicher Art)	Durch mangelhafte Regelstrategie von mehreren Wärmeerzeugern kein stabiler Betrieb (häufige Startvorgänge), zeitweise Unterversorgung oder ineffiziente Betriebsweisen
A2	Kesselfolgeschaltung (Spezielle Art des Fehlers A1)	Durch mangelhafte Regelstrategie von Mehrkesselanlagen kein stabiler Betrieb (häufige Startvorgänge) oder zeitweise Unterversorgung
A3	Regelstrategie bei Ausfall eines Erzeugers	Durch mangelhafte Regelstrategie für den Ersatz ausgefallener Wärmeerzeuger kein stabiler Betrieb (häufige Startvorgänge) oder zeitweise Unterversorgung
S2	Regelgüte Lüftungsanlage	Zulufttemperatur der Lüftungsanlage kann nicht stabil geregelt werden. Es kommt zur Wechselwirkung zwischen Heiz- und Kühlregister. Besonders Problematisch bei Lüftungsanlagen wenn durch Schwingung der Frostschutz ausgelöst wird

5 - Pumpenwechsel bei Doppelpumpen mit redundanter Anlagenversorgung

Symptom: Pumpe in der vergangenen Woche nicht in Betrieb (außer Sommerbetrieb).

Benötigt: Betriebssignal, Außentemperatur.

Beschreibung: Es wird ein mindestens wöchentlicher Wechsel der Führungspumpe vorausgesetzt. Es muss ein Betriebssignal jeder Pumpe vorhanden oder aus Messdaten bestimmbar sein.

Regel: WENN Heizungsanlage in Betrieb und (Pumpe 1 oder Pumpe 2) innerhalb von einer Woche nicht in Betrieb DANN besteht ein Fehler

Fehlerarten:

Tabelle 5.5-5: Fehlerliste für Regel 5 - *Pumpenwechsel bei Doppelpumpen mit redundanter Anlagenversorgung*

	Bezeichnung	Beschreibung / Beispiel
A7	Pumpenwechsel	kein Pumpenwechsel bei Doppelpumpen

6 - Anti-Blockierschaltungen

Symptom: Komponente in der vergangenen Woche nicht in Betrieb bzw. bewegt worden.

Benötigt: Betriebssignal.

Beschreibung: Es muss ein Betriebssignal jeder Pumpe vorhanden oder aus Messdaten bestimmbar sein.

Regel: WENN Pumpe innerhalb von einer Woche nicht in Betrieb DANN besteht ein Fehler

Fehlerarten:

Tabelle 5.5-6: Fehlerliste für Regel 6 - *Anti-Blockierschaltungen*

	Bezeichnung	Beschreibung / Beispiel
P9	Anti-Blockierschaltungen	Keine Anti-Blockierschaltungen programmiert, Komponenten erleiden Standschäden

7 - Überprüfung von Abhängigkeiten zwischen Komponenten

Symptom: Komponente A (nur / nicht) (in Betrieb / aus) wenn B (in Betrieb / aus).

Benötigt: Betriebssignale.

Beschreibung: Die Betriebssignale der entsprechenden Komponenten müssen vorhanden oder aus Messdaten bestimmbar sein.

Regel 1: WENN Pumpe in Betrieb und Ventilstellung kleiner 3% DANN besteht ein Fehler

Regel 2: WENN Befeuchtung und Entfeuchtung gleichzeitig in Betrieb DANN besteht ein Fehler

Fehlerarten:

Tabelle 5.5-7: Fehlerliste für Regel 7 - *Überprüfung von Abhängigkeiten zwischen Komponenten*

	Bezeichnung	Beschreibung / Beispiel
A4	Betriebszeiten Pumpen	Nicht benötigte Pumpen werden nicht ausgeschaltet
A5	Abstimmung zwischen Pumpen und Ventilen bzw. Klappen	Pumpen und dazugehörige Ventile werden nicht gekoppelt und arbeiten gegeneinander
A6	Abstimmung zwischen Pumpen und Wärmeerzeugern	Pumpen und dazugehörige Wärmeerzeuger werden nicht gekoppelt

	Bezeichnung	Beschreibung / Beispiel
A8	Schaltung von Ventilen und Absperrklappen	Ventile werden falsch geschaltet und Bereiche nicht versorgt oder hydraulisch komplett abgetrennt
A9	Nutzung Heizpatrone	Dauerhafte Nutzung der elektrischen Heizpatrone des Warmwasserbereiters, obwohl die Versorgung über das Wärmenetz möglich ist
A10	Regelstrategie Be- und Entfeuchtung	Gleichzeitiges Be- und Entfeuchten bei Vollklima
A11	Abstimmung zwischen Wärme und Kälte	Bereiche werden gleichzeitig mit Wärme und Kälte versorgt
K3	Fehlfunktion der Wärmepumpe	z. B. Kühlen im Heizfall, Ausfall

8 - Druck / Differenzdruck

Symptom 1: Druck außerhalb erwarteten Bereichs.

Symptom 2: Differenzdruck außerhalb erwarteten Bereichs.

Benötigt: Druckdaten, ggf. Betriebssignale.

Beschreibung: Prüfung von Differenzdruck darf nur erfolgen, wenn die entsprechenden Pumpen auch in Betrieb sind

Regel 1: WENN Absolutdruck über 4 bar DANN besteht ein Fehler

Regel 2: WENN Differenzdruck unter 1 bar und Pumpe in Betrieb DANN besteht ein Fehler

Fehlerarten:

Tabelle 5.5-8: Fehlerliste für Regel 8 - Druck / Differenzdruck

	Bezeichnung	Beschreibung / Beispiel
H5	Pumpenleistung (siehe auch Fehler A4)	Zu hohe oder niedrige Pumpenleistung. Es kommt zu Strömungsgeräuschen oder Unterversorgung von Bereichen
K6	Pumpendefekt	Verschleiss, fehlende Anti-Blockierschaltung
K10	Druckhaltung defekt	Statischer Druck nicht mehr im gewünschten Wertebereich
K11	Wasserverlust / Leckage	Druckverlust und ggf. Wasserschaden durch Wasseraustritt an schadhafte Komponenten oder Rohrleitungen
L4	Pumpen manuell auf falscher Leistungsstufe (siehe auch Fehler H5)	Zu hohe oder zu niedrige Pumpenleistung. Es kommt zu Strömungsgeräuschen oder Unterversorgung von Bereichen

9 - Legionellenvorsorge

Symptom: Temperatur im Warmwasserspeicher in der letzten Woche nicht über X°C.

Benötigt: Temperaturdaten Warmwasserbereiter.

Beschreibung: Prüfung ob thermische Desinfektion erfolgt ist

Regel: WENN maximale Temperatur des Warmwassers in einer Woche unter X°C DANN besteht ein Fehler

Fehlerarten:

Tabelle 5.5-9: Fehlerliste für Regel 9 - *Legionellenvorsorge*

	Bezeichnung	Beschreibung / Beispiel
K13	Legionellenvorsorge	Vorsorge im Warmwasserbereiter wird nicht durchgeführt

10 - Auskühlung Zirkulation Warmwasser

Symptom: Zirkulationswasser kühlt mehr als 5K oder weniger als 2K aus.

Benötigt: Temperaturdaten Zirkulation, Betriebssignal.

Beschreibung: Prüfung ob Auskühlung im erlaubten Bereich.

Regel: WENN Zirkulation in Betrieb und Differenz zwischen Vorlauf Warmwasser und Rücklauf Zirkulation größer 5K DANN besteht ein Fehler

Fehlerarten:

Tabelle 5.5-10: Fehlerliste für Regel 10 - *Auskühlung Zirkulation Warmwasser*

	Bezeichnung	Beschreibung / Beispiel
K6	Pumpendefekt	Verschleiss, fehlende Anti-Blockierschaltung
L9	Zirkulationspumpe Warmwasser auf falscher Leistungsstufe	Manuell wird eine zu hohe oder zu niedrige Pumpenleistung eingestellt. Temperaturspreizung von Warmwasservorlauf- und rücklauftemperatur zu niedrig bzw. hoch.

11 - Einhaltung von Heiz- und Kühlkurven

Symptom: Absolutwert der Korrelation zwischen Soll- und Istwert ist kleiner als X.

Benötigt: Soll- und Ist-Temperatur, Betriebssignal.

Beschreibung: Bei zu geringer Korrelation vom Soll- zum Istwert bzw. vom Istwert zur Außentemperatur besteht ein fehlerhafter Betrieb.

Regel 1: WENN Kreis in Betrieb und Korrelation zwischen Soll- und Istwert kleiner als 0.5 DANN besteht ein Fehler

Regel 2: WENN Kreis in Betrieb und Absolutwert der Korrelation zwischen Istwert und Außentemperatur kleiner als 0.5 DANN besteht ein Fehler

Fehlerarten:

Tabelle 5.5-11: Fehlerliste für Regel 11 - *Einhaltung von Heiz- und Kühlkurven*

	Bezeichnung	Beschreibung / Beispiel
H4	Durchfluss bei Wärmeübertragern	Primär- und Sekundär volumenstrom sind nicht abgeglichen, dadurch wird eine Rücklaufanhebung oder zu geringe Wärmeübertragung verursacht
K6	Pumpendefekt	Verschleiss, fehlende Anti-Blockierschaltung
K7	Ausfall Klappen oder Ventile (siehe auch Fehler L5, L6)	Verschleiss, häufige Ursache: fehlende Anti-Blockierschaltung
S1	Ventile nicht im Regelbereich	Wassermenge kann nicht ausreichend ausgeregelt werden, es kommt zu schwankenden Temperaturen

	Bezeichnung	Beschreibung / Beispiel
S2	Regelgüte Lüftungsanlage	Zulufttemperatur der Lüftungsanlage kann nicht stabil ausgeregelt werden. Es kommt zur Wechselwirkung zwischen Heiz- und Kühlregister. Besonders Problematisch bei Lüftungsanlagen, wenn durch Schwingung der Frostschutz ausgelöst wird
S3	Schwingende Mischkreise	Regelparameter stimmen nicht und/oder Totzeiten sind zu groß, dadurch kommt es zum Über- bzw. Unterschwingen der Solltemperatur
L5	Manuell betätigte Absperrventile oder Bypässe (siehe auch Fehler K7)	Absperrventile / Bypässe werden bei Wartungsarbeiten geschlossen / geöffnet und nach Abschluss der Arbeiten nicht wieder in den Ursprungszustand versetzt
L6	Ventilstellung Mischventile (siehe auch Fehler K7)	Ventile im Handbetrieb auf einer Stellung fixiert

12 - Temperaturspreizung bei Heizkreisen

Diese Regel entspricht der Regel F02 aus [45] , wird aber um weitere Bedingungen ergänzt, um sie in der praktischen Anwendbarkeit zu verbessern.

Symptom: Temperaturspreizung kleiner XK.

Benötigt: Vor- und Rücklauftemperatur, Betriebssignal.

Beschreibung: Bei zu kleiner Temperaturspreizung wird ein Fehler angenommen.

Regel: WENN Heizkreis in Betrieb und Vorlauftemperatur - Rücklauftemperatur länger als x Minuten kleiner als 5K DANN besteht ein Fehler

Fehlerarten:

Tabelle 5.5-12: Fehlerliste für Regel 12 - *Temperaturspreizung bei Heizkreisen*

	Bezeichnung	Beschreibung / Beispiel
H8	Hydraulische Einbindung Lüftungsanlagen	Bei volumenkonstanter Regelung oder bei Überströmeinrichtungen fließt ungenutztes Wasser (Wärme) im Kurzschluss zurück und verursacht eine Rücklaufenhebung.
H9	Abgleich von Heizflächen	Heizflächen sind nicht abgeglichen, es kommt zur Rücklaufenhebung und/oder Unterversorgung von Bereichen
K12	Motorventile oder Thermostate	Defekt, meist mechanisch auf Grund von Fehlbedienung oder Vandalismus
P3	Fehlerhaftes Hydraulikschema	z. B. Kurzschlüsse

13 - Rücklauftemperatur in Abhängigkeit der Außentemperatur

Symptom: Die Rücklauftemperatur eines Heizkreises bzw. Bereichs steigt mit steigender Außentemperatur [37] .

Benötigt: Rücklauftemperatur, Außentemperatur, Betriebssignal.

Beschreibung: Eine mit der Außentemperatur ansteigende Rücklauftemperatur deutet auch hydraulische Kurzschlüsse hin.

Regel: WENN Heizkreis in Betrieb und Steigung der Regressionsgeraden von der Rücklauftemperatur über der Außentemperatur positiv DANN besteht ein Fehler

Fehlerarten:

Tabelle 5.5-13: Fehlerliste für Regel 13 - *Rücklauftemperatur in Abhängigkeit der Außentemperatur*

	Bezeichnung	Beschreibung / Beispiel
H2	Durchfluss in Hydraulischer Weiche	Volumenströme auf Primär- oder Sekundärseite zu groß, damit Probleme mit Rücklaufanhebung oder beim Einhalten der Soll-Vorlauftemperatur
H8	Hydraulische Einbindung Lüftungsanlagen	Bei volumenkonstanter Regelung oder bei Überströmeinrichtungen fließt ungenutztes Wasser (Wärme) im Kurzschluss zurück und verursacht eine Rücklaufanhebung.
P3	Fehlerhaftes Hydraulikschema	z. B. Kurzschlüsse

14 - Temperaturspreizung bei Wärmeerzeugern

Symptom: Temperaturspreizung kleiner XK.

Benötigt: Vor- und Rücklauftemperatur, Betriebssignal.

Beschreibung: Bei zu geringer Temperaturspreizung passt die Wassermenge nicht zu der eingebrachten Leistung.

Regel: WENN Wärmeerzeuger in Betrieb und Temperaturspreizung kleiner als 10K DANN besteht ein Fehler.

Fehlerarten:

Tabelle 5.5-14: Fehlerliste für Regel 14 - *Temperaturspreizung bei Wärmeerzeugern*

	Bezeichnung	Beschreibung / Beispiel
H1	Abgleich der Wassermenge durch Wärmeerzeuger	Volumenströme nicht entsprechend der Leistung angepasst, es gibt Probleme bei der Abgabe der Wärme oder beim Einhalten der Vorlauftemperatur
H2	Durchfluss in Hydraulischer Weiche	Volumenströme auf Primär- oder Sekundärseite zu groß, damit Probleme mit Rücklaufanhebung oder beim Einhalten der Soll-Vorlauftemperatur
H3	Durchfluss durch Pufferspeicher	Der Volumenstrom ist zu hoch, es kann sich keine Temperaturschichtung einstellen
H4	Durchfluss bei Wärmeübertragern	Primär- und Sekundärvolumenstrom sind nicht abgeglichen, dadurch wird eine Rücklaufanhebung oder zu geringe Wärmeübertragung verursacht

15 - Vergleich von Rücklauftemperaturen

Symptom: Gesamtrücklauftemperatur eines Bereichs ist größer als der Maximalwert der Einzelsrücklauftemperaturen.

Benötigt: Rücklauftemperaturen, Betriebssignal.

Beschreibung: Bei zu geringer Temperaturspreizung passt die Wassermenge nicht zu der eingebrachten Leistung.

Regel: WENN Heizkreis in Betrieb und Gesamtrücklauftemperatur größer als maximaler Wert der Einzelsrücklauftemperaturen DANN besteht ein Fehler.

Fehlerarten:

Tabelle 5.5-15: Fehlerliste für Regel 15 - *Vergleich von Rücklauftemperaturen*

	Bezeichnung	Beschreibung / Beispiel
P11	Nachrüstung von Teilsystemen	Nachträglicher Einbau von fehlerhaften Komponenten oder fehlerhafte Einbindung (z.B. hydraulisch nicht abgeglichen)

16 - Raumtemperatur

Symptom: Raumtemperatur während der Nutzungszeit unter X °C

Benötigt: Raumtemperatur, Nutzungszeit.

Beschreibung: Raum wird nicht ausreichend erwärmt.

Regel: WENN Nutzungszeit für Raum aktiv und Raumtemperatur außerhalb des Komfortbereichs DANN besteht ein Fehler.

Fehlerarten:

Tabelle 5.5-16: Fehlerliste für Regel 16 - *Raumtemperatur*

	Bezeichnung	Beschreibung / Beispiel
H6	Strömungswiderstand in Wärmeverteilung	Zu große Widerstände in der Strecke. Defekte Rückschlagklappen, blockierte Pumpen usw. verhindern, dass ausreichend Wasser fließt
K7	Ausfall Klappen oder Ventile (siehe auch Fehler L5, L6)	Verschleiss, häufige Ursache: fehlende Anti-Blockierschaltung
L5	Geschlossene Absperrventile (siehe auch Fehler K7)	Absperrventile werden bei Wartungsarbeiten geschlossen und nach Abschluss der Arbeiten nicht wieder geöffnet
L6	Ventilstellung Mischventile (siehe auch Fehler K7)	Ventile im Handbetrieb auf einer Stellung fixiert
Z1	Zugestellte Heizkörper	
Z2	Zugestellte Lüftungseinlässe oder Lüftungsauslässe	

17 - Alterung Wärmeübertrager

Symptom: Die Steigung der Grädigkeit steigt über einen Grenzwert

Benötigt: Rücklauftemperaturen auf Primär- und Sekundärseite, Übertragungsleistung.

Beschreibung: Mit zunehmender Nutzungsdauer verschmutzt der Wärmeübertrager und die Übertragungsleistung sinkt. Nur Werte oberhalb einer Mindest-Übertragungsleistung prüfen, um verbesserte Genauigkeit zu erreichen.

Regel: WENN Steigung über Grenzwert DANN besteht ein Fehler

Fehlerarten:

Tabelle 5.5-17: Fehlerliste für Regel 17 - *Alterung Wärmeübertrager*

	Bezeichnung	Beschreibung / Beispiel
K2	Alterung Wärmeübertrager	Wärmeübertrager sind verschmutzt, die Übertragungsleistung sinkt, der Strömungswiderstand steigt

5.5.2 Bestimmung von Betriebs- und Nutzungszeiten

Wenn keine Information über die Nutzungszeiten eines Gebäudes oder Teilbereichen eines Gebäudes vorliegen, kann diese unter Umständen aus Zählerdaten bestimmt werden und somit für die Überprüfung von Regeln genutzt werden. Dafür müssen Daten vorliegen, die direkt mit der Nutzung verknüpft sind, dies können beispielsweise Wasserzähler oder Stromzähler sein, die dem nutzerbeeinflussten Verbrauch zuzuordnen sind. Als Beispiel wird hier ein Auszug der Leistungsdaten eines Fahrstuhls

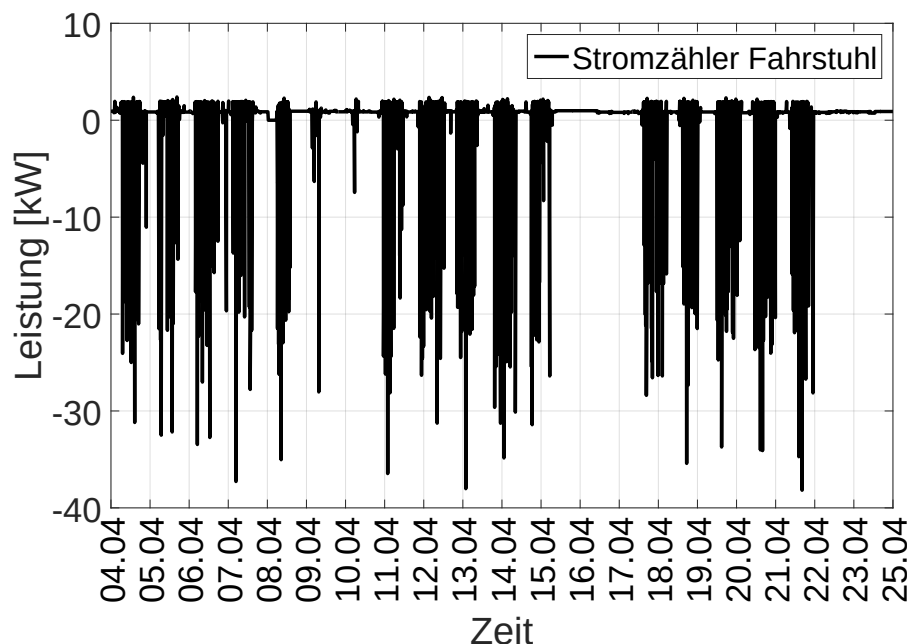


Abbildung 5.5-1: Stromzähler Fahrstuhl, Leistungssignal

gezeigt, siehe Abbildung 5.5-1. Bei Nutzung des Fahrstuhls kommt es zur Energierückgewinnung und damit negativen Werten des Zählers. Andere Zähler, z.B. Stromzähler für Beleuchtung und technische Ausstattung wie PCs und Küchen, haben einen Grundverbrauch und höheren Verbrauch wenn Menschen das Gebäude nutzen. In einem Histogramm kann - nach Datenvorbereitung wie dem Entfernen von Ausreißern - die Häufigkeitsverteilung der Verbrauchswerte angezeigt werden. Diesen ordnet man nun eine Wahrscheinlichkeit zu, mit der Personen das Gebäude nutzen. In den folgenden Anwendungsbeispielen werden die in Tabelle 5.5-18 genannten Werte verwendet. Damit bekommt man für jeden Zeitpunkt eine Nutzungswahrscheinlichkeit. Diese Werte werden wochenweise aufeinandergelegt und auf den Wert 1 für ständige Anwesenheit zu dieser spezifischen Kombination von Uhrzeit und Wochentag normiert. Aus dem

Tabelle 5.5-18: Nutzungswahrscheinlichkeiten

	Wertebereich	zugeordneter Wert
Anwesenheit	>50%	1
mögliche Anwesenheit	<50% >20%	0.5
keine Anwesenheit	<20%	0

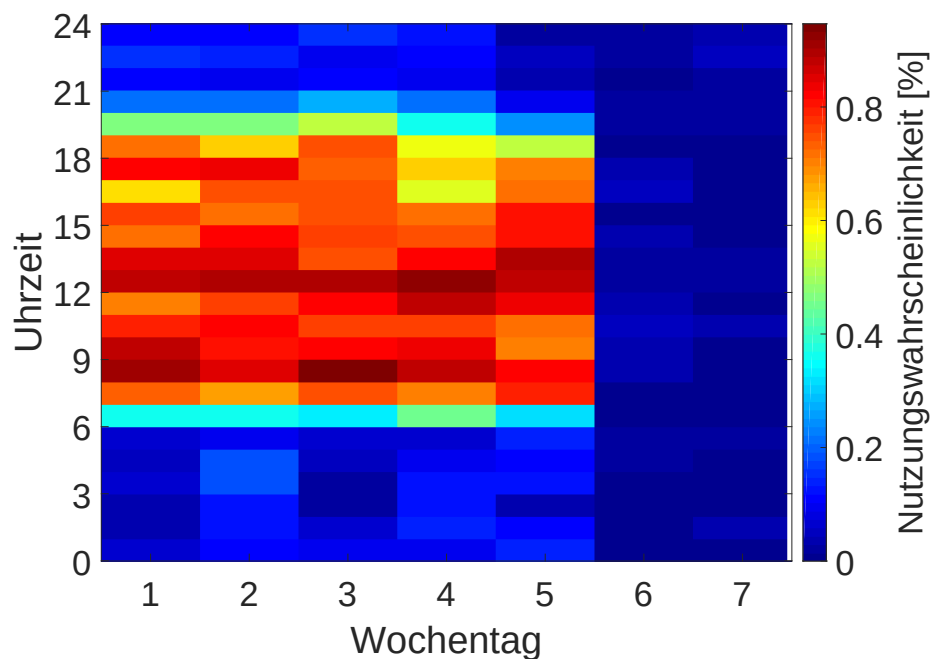


Abbildung 5.5-2: Nutzungszeiten Fahrstuhl, bestimmt über Stromverbrauch

Signal für den Fahrstuhl erhält man damit die in Abbildung 5.5-2 dargestellten Nutzungszeiten für das dazugehörige Gebäude. Die Zahlen auf der X-Achse entsprechen dabei den Wochentagen mit 1: Montag bis 7: Sonntag. Ab 6 Uhr wird der Fahrstuhl regelmäßig genutzt, ab 7 Uhr häufig, am Abend bis 19 bzw. 20 Uhr. In der Nacht an Wochentagen gibt es hin und wieder eine Fahrt, am Wochenende sehr selten.

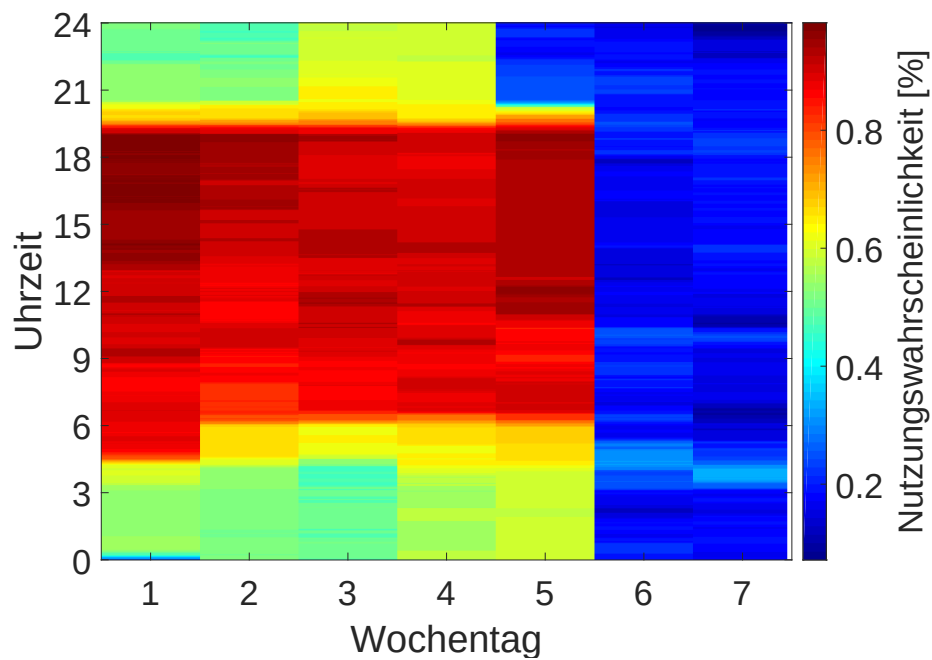


Abbildung 5.5-3: Nutzungszeiten RLT, bestimmt über Stromzähler

Die aus dem Stromzähler des Fahrstuhls bestimmten Nutzungszeiten können genutzt werden, um die Nutzungszeiten einzelner Bereiche oder Komponenten zu prüfen. In 5.5-3 wird die analog erstellte Nutzung einer Lüftungsanlage dieses Gebäudes dargestellt, bei denen im Gegensatz zur Nutzung des Fahrstuhls auch in 50% von Montag 0 Uhr bis Freitag 21 Uhr nachts Betrieb angenommen werden muss. In Abbildung 5.5-4 sind

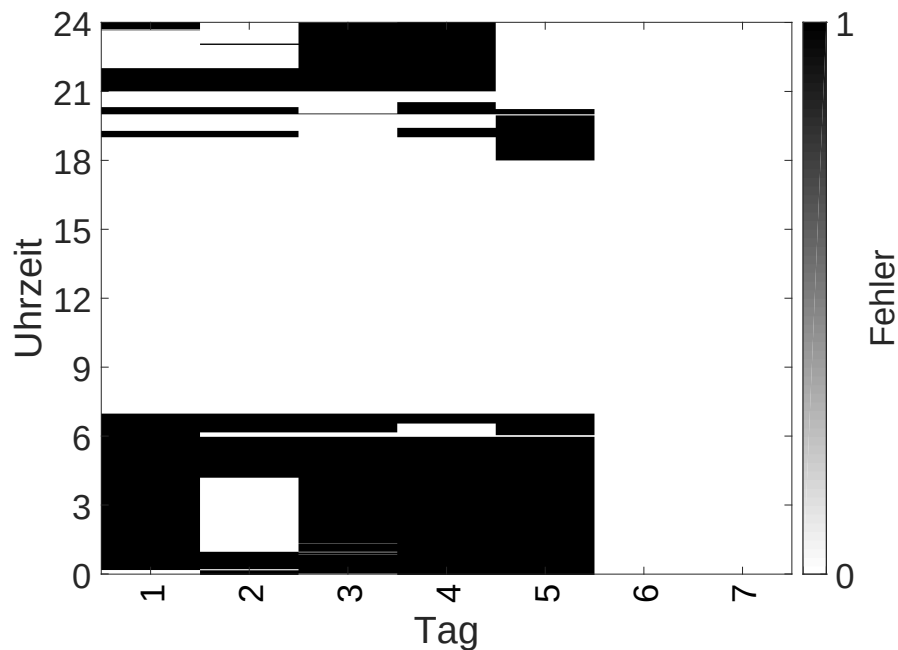


Abbildung 5.5-4: Nutzungszeiten RLT, Fehlererkennung

die Zeiträume, in denen Lüftungsanlage Strom verbraucht, obwohl sich vermutlich we-

nige oder keine Menschen im Gebäude aufhalten, markiert. Als Fehlergrenze wurde eine Abweichung größer 40% zwischen Gebäudenutzung (Abbildung 5.5-2) und Nutzung der Lüftungsanlage (Abbildung 5.5-3) gewählt. Für diese Zeiten - bzw. für die kompletten Nächte und den Freitag Abend - ist zu prüfen, ob ein Betrieb der Anlage notwendig ist.

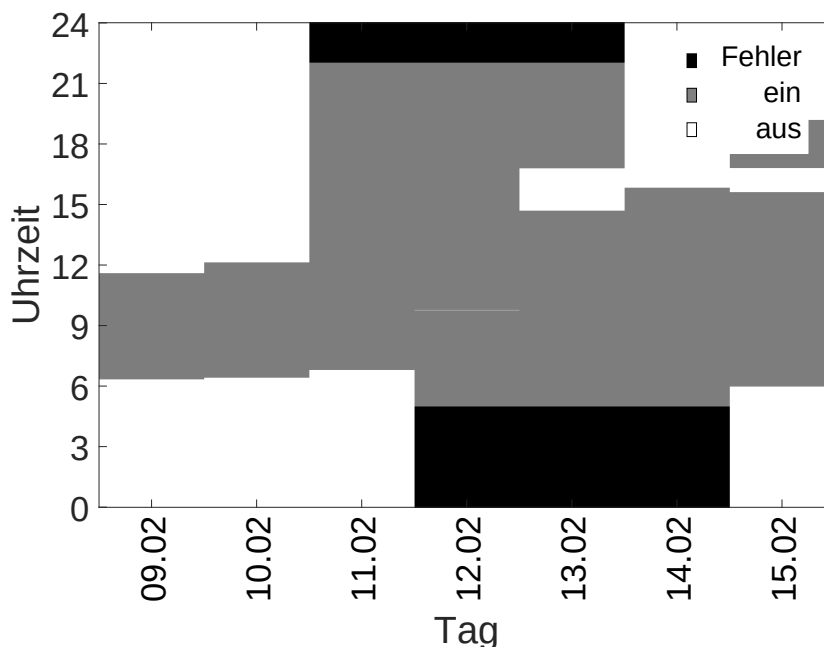


Abbildung 5.5-5: Fehlererkennung: Nutzungszeiten

Sind die Nutzungszeiten für eine Komponente bekannt, so kann eine automatische Überprüfung eingerichtet werden, die diese überprüft und ggf. Fehler und Mehrverbrauch meldet. Für die Lüftungsanlage eines weiteren Gebäudes wurde eine automatische Prüfung programmiert, die im Fehlerfall eine Meldung und Grafik ausgibt. Die Abbildung 5.5-5 zeigt das Ergebnis einer solchen Überprüfung. Diese Lüftungsanlage wird nur auf Nutzeranforderung hin gestartet und sollte beim Verlassen der Räumlichkeiten manuell wieder ausgeschaltet werden. Im Prüfzeitraum wurde dies am 11.2. vergessen, so dass sie bis zum 13.2. Nachmittags durchlief. Dann wurde sie erneut angestellt und erst am 14.2. Nachmittags ausgeschaltet. Die Daten werden darauf geprüft, ob die Lüftungsanlage nachts (d.h. zwischen 22 Uhr abends und 5 Uhr morgens) in Betrieb ist, im positiven Fall wird der Fehler gemeldet. Die Methodik hilft dabei, die Regeln vom Typ 1 - *Nutzungszeiten* (siehe Abschnitt 5.5.1) einrichten zu können.

5.5.3 Bestimmung von Kennwerten

Für einen Teil der im Abschnitt 5.5.1 definierten Regeln werden Kennzahlen benötigt, um die entsprechende Regel ausführen zu können. Beispiele wird ein mögliches Vorgehen wird hier für drei dieser Regeln gezeigt. Bei Regel 17: *Alterung mit der Nutzungsdauer* wird ein Maß für die Alterung gesucht. Ablagerungen verschlechtern mit fortlaufender Nutzungsdauer den Wärmeübergang in einem Wärmeübertrager. Die Grädigkeit ist definiert als die Temperaturdifferenz der Rückläufe auf Primär- und Sekundärseite und kann als Güte der Leistungsfähigkeit verwendet werden. Bei Fern-

wärmeversorgung hat eine höhere Grädigkeit zur Folge, dass die verfügbare Heizleistung durch die verminderte Temperaturspreizung auf Primärseite vermindert wird und es zeitweilig zu einer Unterversorgung kommen kann. Das Beispiel wurde aus ModQS [46] übernommen. Für einen Wärmeübertrager wurde die Grädigkeit berech-

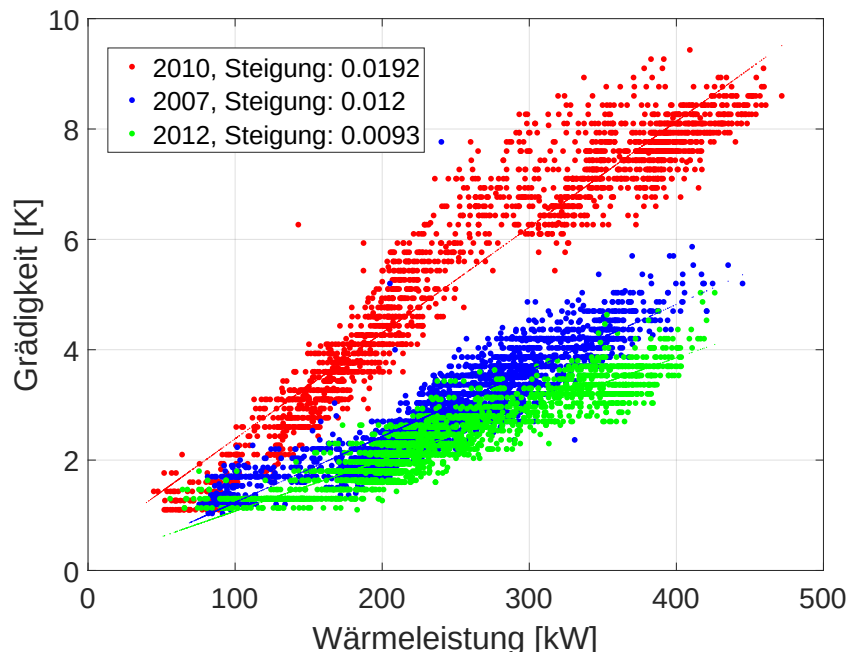


Abbildung 5.5-6: Grädigkeit eines Wärmeübertragers

net und über die Übertragungsleistung aufgetragen (Grafik 5.5-6). Von Jahr 2007 zu 2010 wurde die Übertragungsleistung deutlich schlechter. Daraufhin wurde der Wärmeübertrager getauscht und in 2012 stellt sich ein deutlich verbesserter Betrieb ein. Als Kennzahl kann die Steigung der Ausgleichsgeraden verwendet werden. Übersteigt sie einen Grenzwert, in diesem Anwendungsfall liegt er im Bereich 0.017 K/kW wird ein fehlerhafter Betrieb angenommen.

Für die Regel 11: *Einhaltung von Heiz- und Kühllkurven* wird die Korrelation von Soll- und Ist-Temperatur benötigt. Auch für die Prüfung einer Außentemperaturabhängigkeit ist die Korrelation ein Gütekriterium. Der Korrelationskoeffizient nähert sich bei guter Übereinstimmung der 1 (für steigende Geraden) oder -1 (bei abfallenden Geraden) an, 0 bedeutet keine Übereinstimmung. In Abbildung 5.5-7 ist die Ist-Temperatur über die Solltemperatur für einen fehlerfreien (Heizkreis 2) und einen fehlerbehafteten Heizkreis (Heizkreis 1) aufgetragen. Aufgrund eines Defekts im Mischventil des Heizkreises 2 ist die Regelung zeitweise ausgefallen. In der Folge stieg die Vorlauftemperatur deutlich über den Sollwert. Der Korrelationskoeffizient ist mit -0.1 entsprechend niedrig gegenüber dem des Vergleichsheizkreises (0.93).

Abbildung 5.5-8 zeigt die Korrelation von Außentemperatur und Vorlauftemperatur im Verbraucherkreis eines Nahwärmenetzes. Im Zeitraum 1 wird die Vorlauftemperatur nicht nach aktueller Außentemperatur geregelt. Die Korrelation ist entsprechend schlechter als für den Zeitraum 2, zu dem der Fehler behoben wurde.

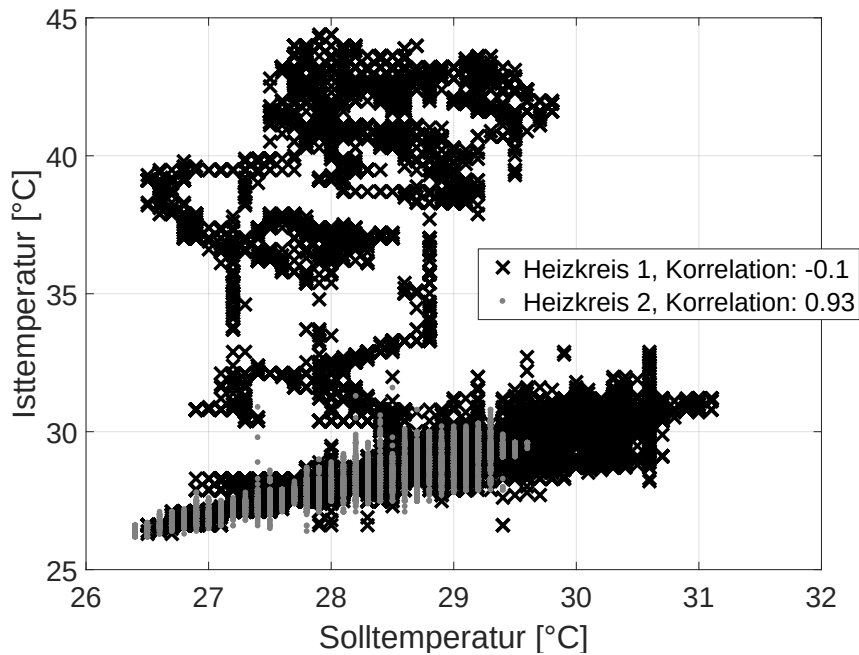


Abbildung 5.5-7: Einhaltung der Heizkurve

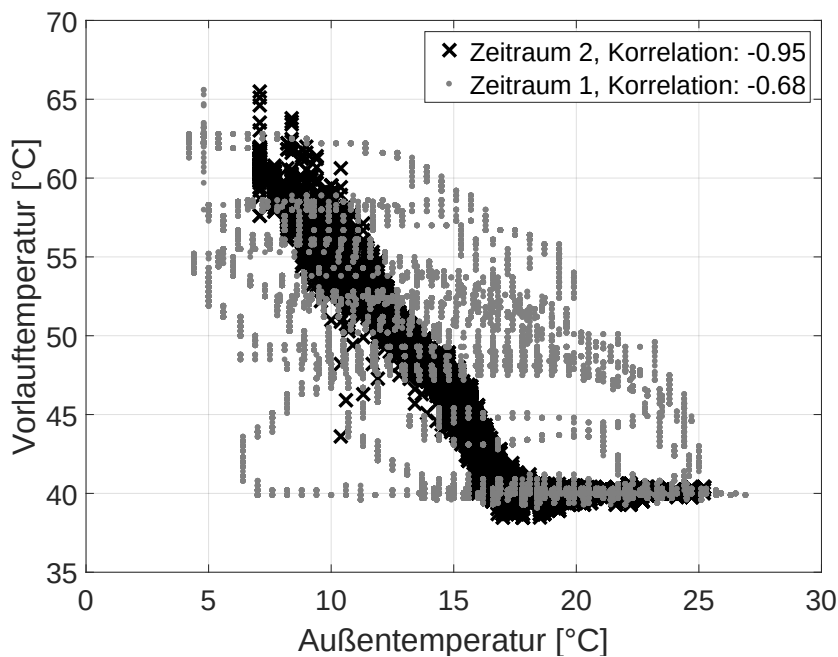


Abbildung 5.5-8: Verknüpfung von Heizkurve und Außentemperatur

Für die Regel 4: *Mindestlaufzeiten / Mindestausschaltzeiten* werden die Längen der Laufzeiten bzw. die Dauer der Pausen zwischen zwei Laufzeiten benötigt. Berechnet werden können diese, in dem die Abstände zwischen den Zeitpunkten bestimmt werden, an denen das Signal von 0 auf 1 bzw. von 1 auf 0 wechselt. Eine effektive Art diese Berechnung durchzuführen ist es, von dem Betriebssignal das gleiche Signal abzuziehen, aber um einen Zeitschritt versetzt. So wird ein Vektor berechnet, in dem

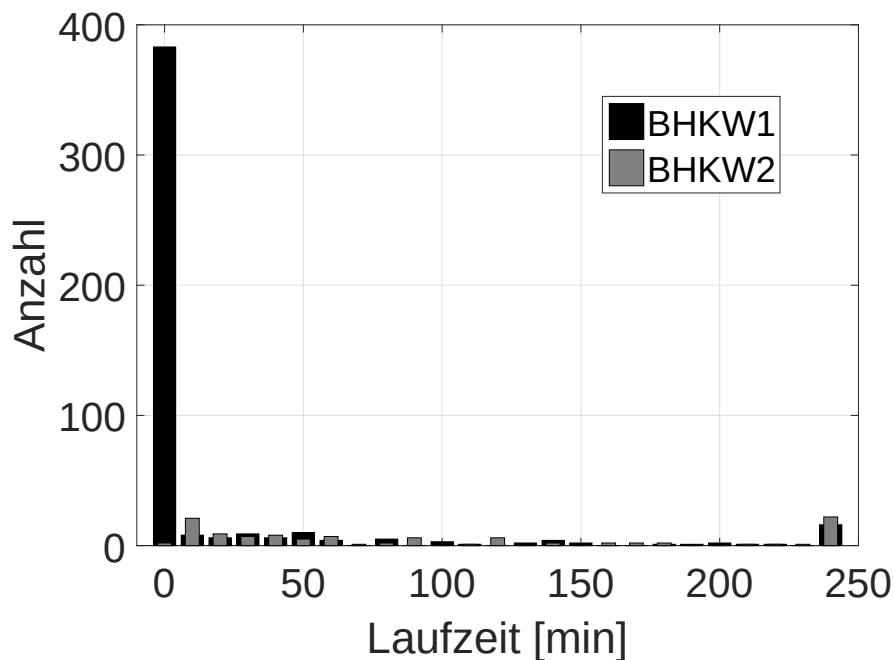


Abbildung 5.5-9: Laufzeiten BHKW: Fehlerhafte Einschaltbedingung

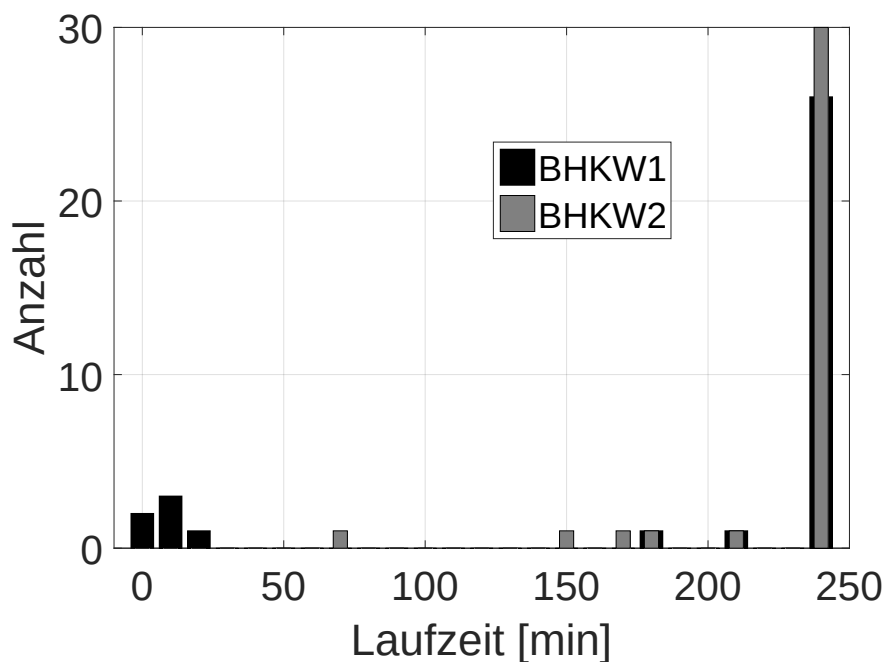


Abbildung 5.5-10: Laufzeiten BHKW: Fehlerfrei

hauptsächlich der Wert 0 enthalten ist und die gesuchten Zeitpunkte mit 1 bzw. -1 angezeigt werden. In den Abbildungen 5.5-9 und 5.5-10 ist das Ergebnis dieser Methodik dargestellt. Der Betrachtungszeitraum ist jeweils ein Monat. Während des Zeitraums der linken Grafik sorgte ein Fehler in der Regelstrategie - die Einschaltbedingungen für ein und zwei BHKWs waren vertauscht, d.h. es wurden immer zwei BHKWs angestellt obwohl nur eins benötigt wurde - für eine häufige Anzahl an kurzen Laufzeiten.

Es gab fast 400 Startvorgänge mit Laufzeiten unter 5 Minuten. Im Vergleichszeitraum kam es nur zu fünf dieser kurzen Laufzeiten, welche durch Startprobleme des BHKWs begründet waren.

5.5.4 Überprüfung der Raumtemperatur

Die Norm DIN EN 15251¹⁰ beschreibt unter anderem zulässige Raumtemperaturen unter Beachtung der Nutzung, des Gebäudetyps und der technischen Ausstattung. Mit Beachtung dieser Norm kann geprüft werden, ob die Raumtemperatur während

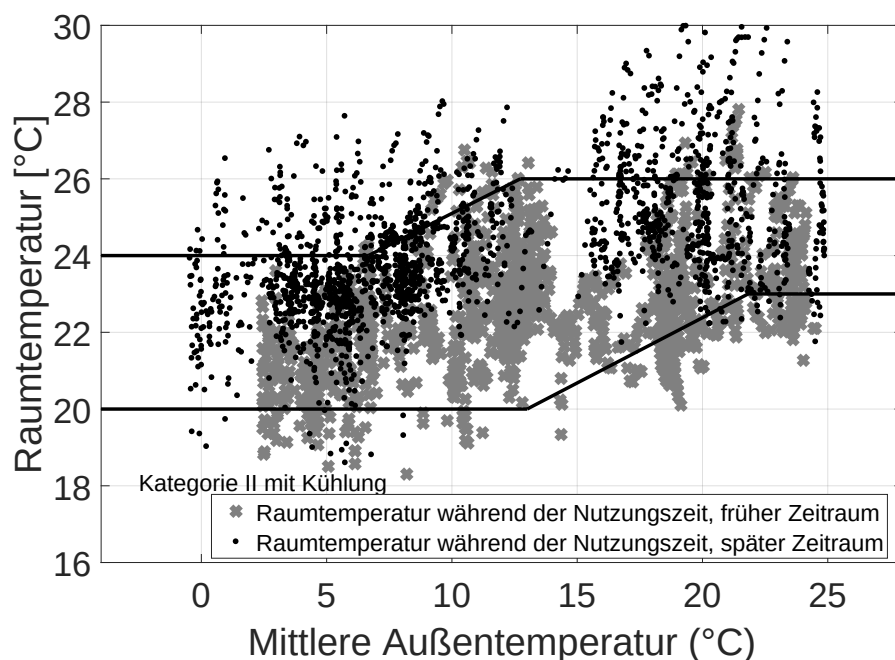


Abbildung 5.5-11: Einhaltung der Komfortgrenzen gemäß DIN EN 15251

der Nutzungszeiten in dem benötigten Temperaturbereich liegt. In Abbildung 5.5-11 ist dies für ein Gebäude für zwei verschiedene Zeiträume dargestellt. Zwischen diesen Zeiträumen wurden die Betriebsparameter der Wärme- bzw. Kälteerzeugung sowie die Heiz- und Kühlkurven verändert. In der Folge davon verschiebt sich für den betrachteten Raum das Temperaturniveau nach oben und liegt häufig über den Grenzwerten. Für die Fehlererkennung können die Werte außerhalb der Komfortgrenzen betrachtet werden und in Abhängigkeit von der Abweichung von der Komfortgrenze gewichtet werden. Kurzzeitige Über- bzw. Unterschreitungen sollten akzeptiert werden, um z.B. Lüftungseffekte zu berücksichtigen. Die Methodik ergänzt die Regeln vom Typ 16 - *Raumtemperatur* (siehe Abschnitt 5.5.1), sie ist aufwändiger in Einrichtung und benötigter Rechenleistung, aber erweitert die Auswertung um das Einbeziehen der Außentemperatur und um das Verhalten im Kühlfall.

¹⁰<https://www.beuth.de/de/norm/din-en-15251/155677389>

5.5.5 Fehlererkennung mit Faktormatrizen aus Tensorzerlegung

In dem Heizkreis einer Schule wurden im Zuge einer Wartung im Sommer 2015 der Absenkbetrieb für die Nächte und die Wochenenden deaktiviert. In der Abbildung 5.5-12

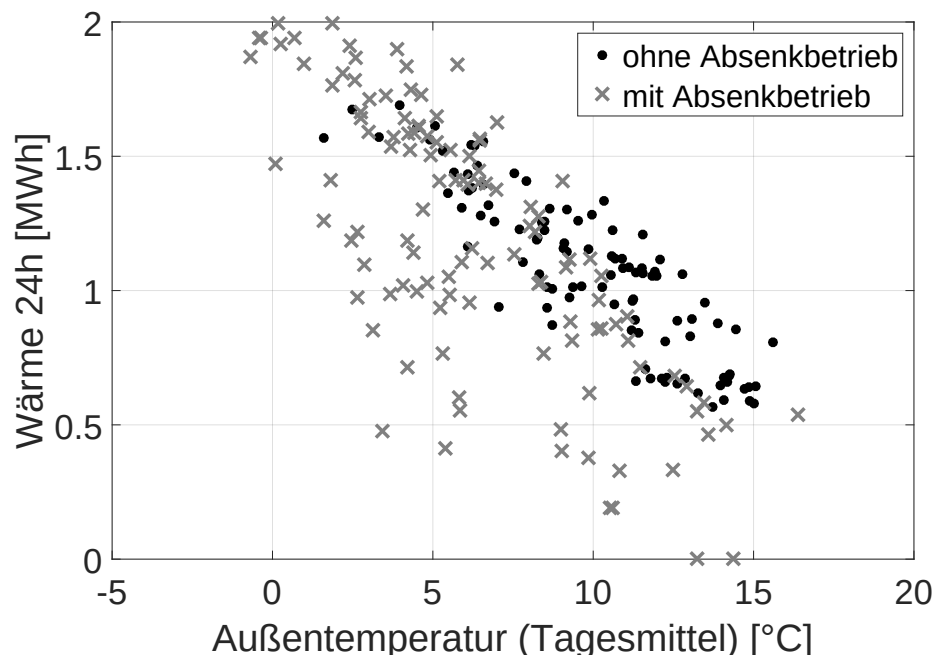


Abbildung 5.5-12: Wärmeverbrauch mit und ohne Absenkbetrieb

ist die Wärmemenge, die täglich von diesem Heizkreis an die Räume abgegeben wird, über die mittlere Außentemperatur aufgetragen. Dabei sind die Daten in Zeiten mit und ohne Absenkbetrieb aufgeteilt. Es ist ein abweichendes Verhalten für die Zeiträume mit und ohne Absenkung zu erkennen, die Zeiten ohne sind tendenziell im oberen Verbrauchsbereich angesiedelt, was sich in den erhöhten Wärmeverlusten in der Nacht begründet. Auch fehlen die niedrigeren Werte für die Wochenendtage. Allerdings ist es nicht möglich, eine klare Trennung zwischen fehlerhaften und fehlerfreien Bereichen zu definieren. Eine Unterscheidung des Verhaltens an Wochenend- zu Wochentagen erfolgt nicht, auch keine des Tag- und Nachtbetriebs. Somit ist dieser Ansatz nicht ausreichend, um den Fehler sicher zu erkennen. Die Kennwerte müssen definierter bestimmt werden, z.B. aufgeteilt in Uhrzeit, Wochentag und ggf. Außentemperatur um ausreichend detailliert für diesen Fehler erkennbar zu machen.

Hierfür bietet sich die Nutzung der in Kapitel 5.3.3 eingeführten Tensoren an. Über den Aufbau des Tensors können bestimmte Eigenschaften wie die Abhängigkeit von der Uhrzeit oder des Wochentags hervorgehoben werden. Dafür werden die Betriebsdaten eines Zählers oder Sensors in einem Tensor abgelegt und dieser zerlegt, um eine Approximation mit einem niedrigen Rang zu erreichen. Geeignet ist beispielsweise eine Zerlegung in *Stunde x Wochentag x Kalenderwoche*. Die so berechneten Faktoren (siehe Gleichung (5.3.34)) der Faktormatrizen können direkt genutzt werden um in den Daten vorliegende Eigenschaften einer Komponente oder eines Systems zu analysieren [29]. Als Einführungsbeispiel für die Nutzung der Tensorfaktoren zur Fehlererkennung wird das Signal eines Stromzählers mit stündlichen Leistungsdaten aus einem Bürobereich einer Bank gewählt. Dieses hat einen sehr regelmäßigen, strukturierten Verlauf und ist so gut geeignet um die Methodik zu demonstrieren. Für die

Tensorfaktoren werden nur positive Werte zugelassen, indem in der *Tensorlab Toolbox* für MATLAB die *Structured Data Fusion (SDF)* Option entsprechend konfiguriert wird [57]. Berechnet man nach der Tensorzerlegung die Zeitreihe anhand der Tensorfaktoren und vergleicht diese mit den originalen Messdaten, so kann man erkennen, dass sich wie erwartet eine Näherungslösung einstellt, die genauer wird, je höher der Rang gewählt wird.

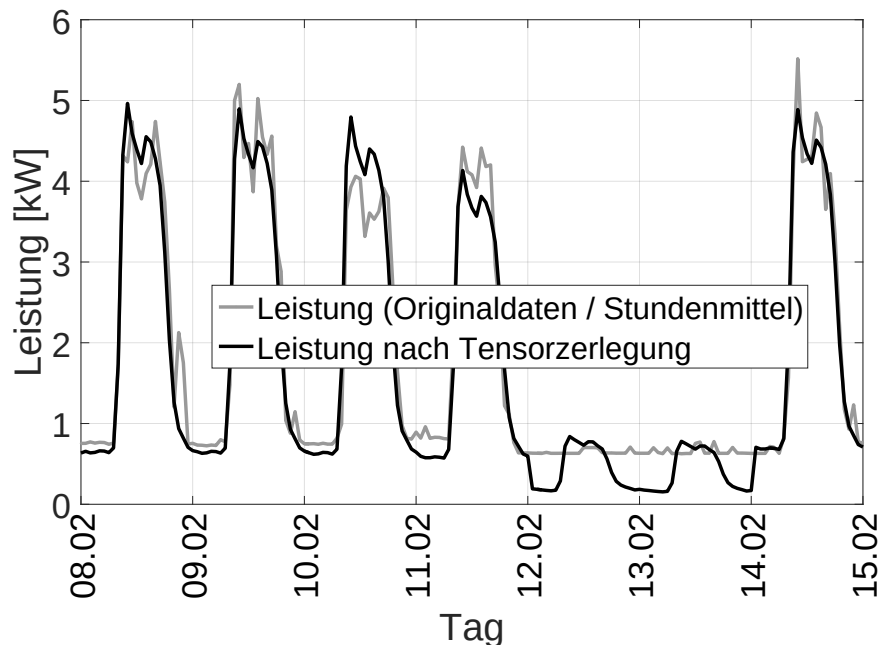


Abbildung 5.5-13: Leistungssignal, original und nach Approximation mit Rang 2

Für Abbildung 5.5-13 wurde dabei der Rang 2 gewählt, für Abbildung 5.5-14 der Rang 3. Zu beobachten ist, dass durch Hinzufügen eines Rangs die Näherung an die Originalwerte für die Tage des Wochenendes - 12.2. und 13.2. - deutlich verbessert wird.

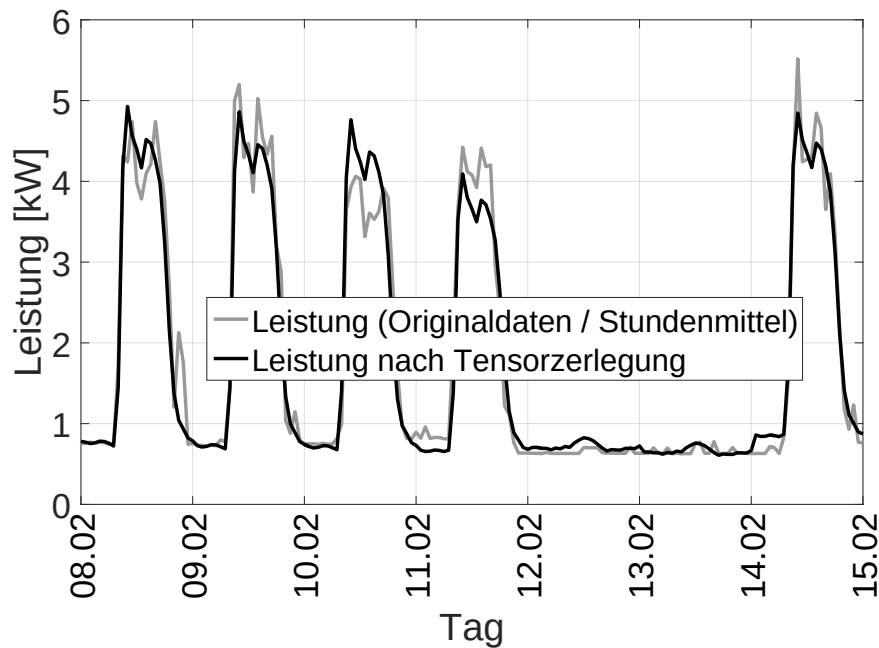


Abbildung 5.5-14: Leistungssignal, original und nach Approximation mit Rang 3

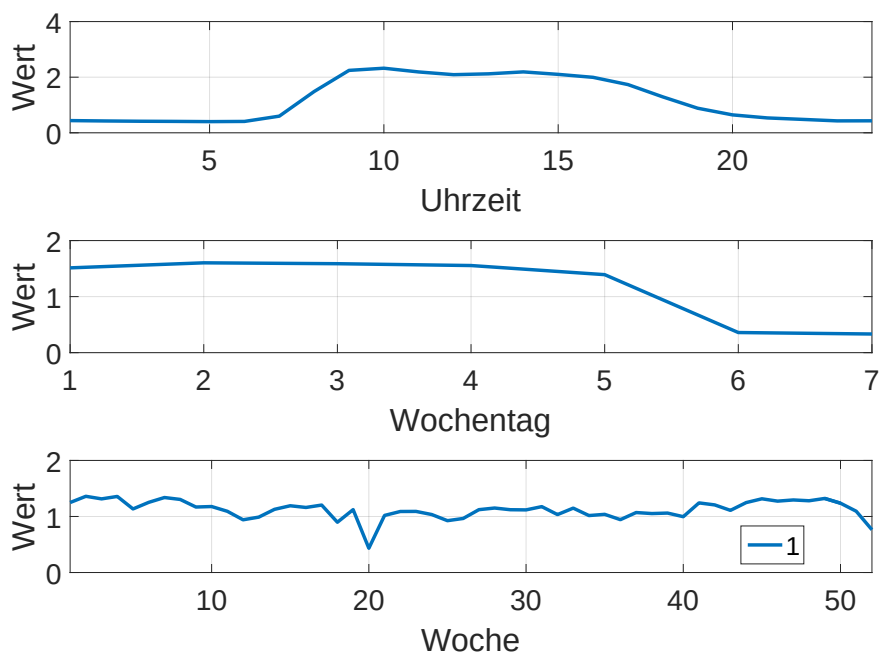


Abbildung 5.5-15: Tensorfaktoren, Rang 1

In den Grafiken 5.5-15 bis 5.5-17 sind die Faktoren nach Rang des Tensors sortiert eingezeichnet. Die Wichtungsfaktoren λ_r sind in die Faktormatrizen eingerechnet, so dass gilt $\lambda_r = 1$. Der Leistungswert in Kilowatt für einen gesuchten Zeitpunkt kann aus der Summe der Produkte aus *Wert für Uhrzeit* mal *Wert für Wochentag* mal *Wert für Woche* für jeden Rang berechnet werden, siehe auch Gleichung (5.3.30). Mit dem Detailgrad der Approximation steigt auch die in den Faktoren interpretierbare Informa-

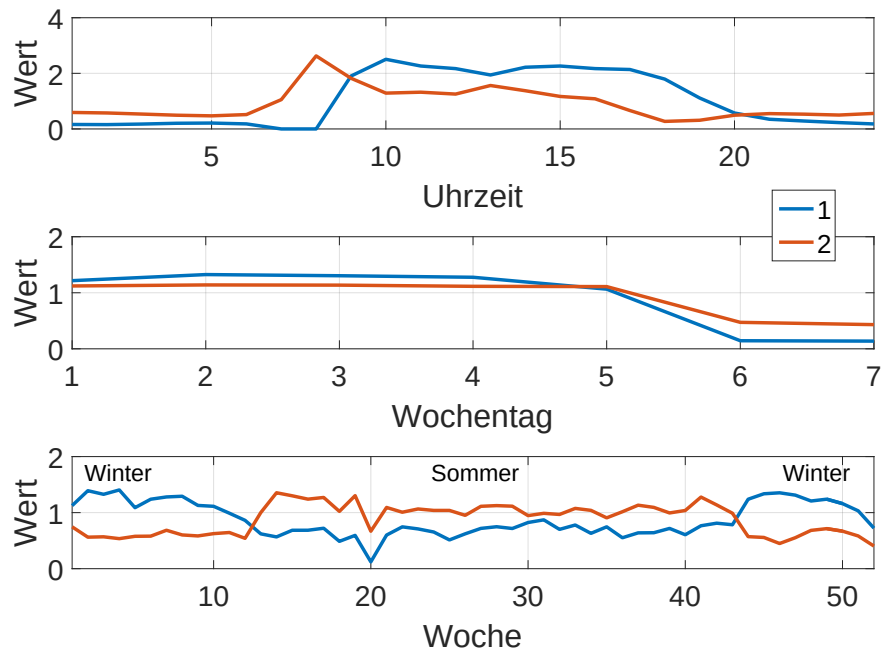


Abbildung 5.5-16: Tensorfaktoren, Rang 2

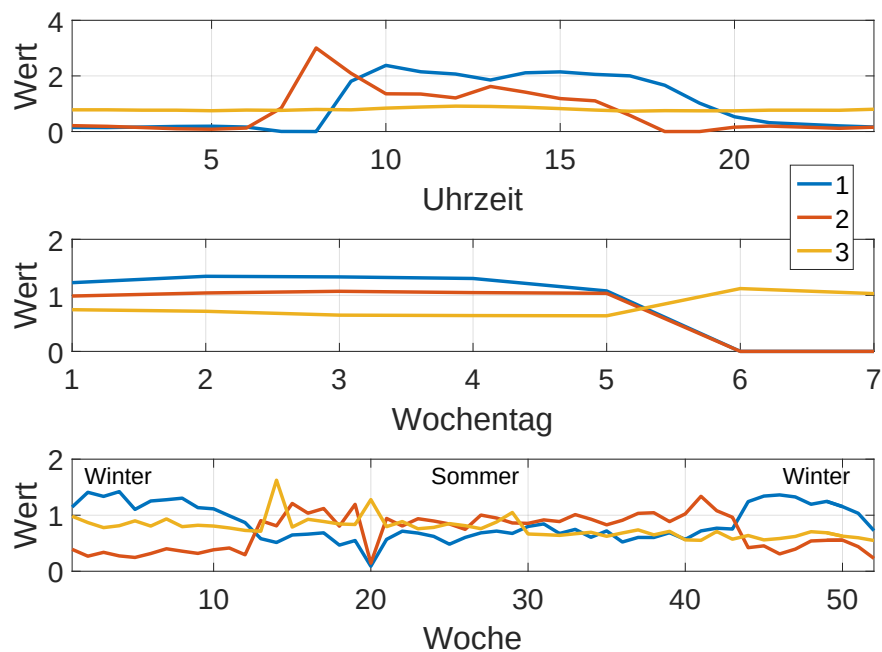


Abbildung 5.5-17: Tensorfaktoren, Rang 3

tion. Für eine Approximation mit dem Rang 1 kann ein gegenüber der Nacht erhöhter Verbrauch am Tag sowie ein an dem Wochenende niedrigerer Verbrauch (Tag 6 ist Samstag, Tag 7 Sonntag) beobachtet werden, siehe Grafik 5.5-15. Bei den Faktoren für Rang 2 ist die Umstellung von der Sommer- zur Winterzeit sichtbar. Die Daten wurden in mitteleuropäischer Zeit (MEZ) eingelesen, ohne Umstellung auf Sommerzeit (MESZ). Die rote Linie in Grafik 5.5-16 bildet den Verbrauch 6 Uhr Morgens ab und die

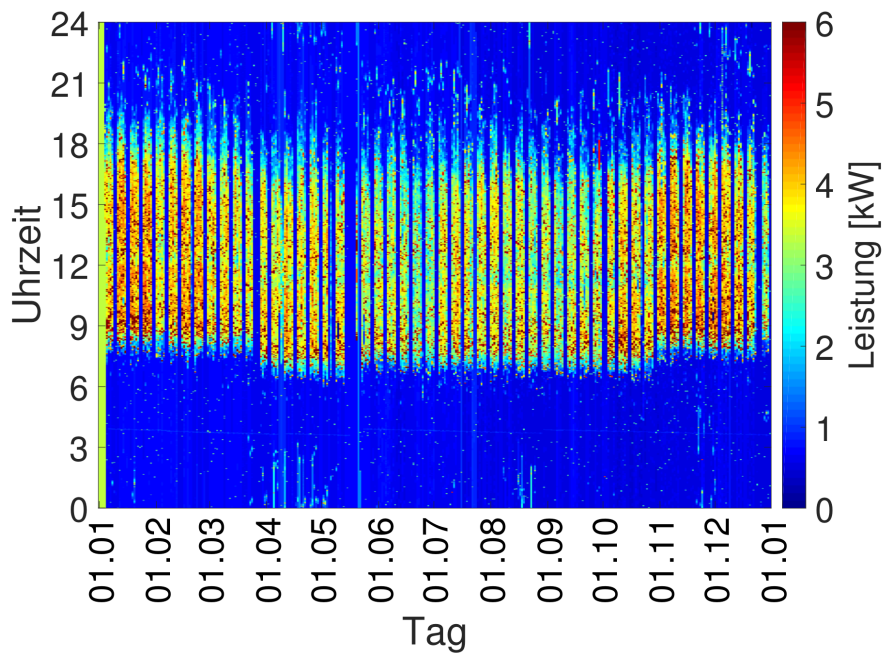


Abbildung 5.5-18: Leistungssignal, Rasterdiagramm

blaue Linie den Verbrauch gegen Feierabend. Diese Werte verschieben sich mit der Umstellung von Sommer- auf Winterzeit. In Abbildung 5.5-18 ist dazu zum Verständnis die Leistung als Rasterdiagramm dargestellt. Auch für diese Grafik sind die Uhrzeiten in MEZ und die Werte für den Sommer damit um eine Stunde nach vorne verschoben. Der dritte Rang beinhaltet zusätzlich die Information für den Verbrauch an Wochenenden, siehe Abbildung 5.5-17, der für diesen Anwendungsfall gleichzeitig der Grundlast entspricht. Auch dies ist in Grafik 5.5-18 zu erkennen. Für Rang 4 (Verbrauch am Montag) und Rang 5 (Verbrauch am Freitag) ist ein weiterer Erkenntnisgewinn möglich, für Approximationen höheren Ranges ist bei diesem Stromzähler keine direkte Zuordnung der Tensorfaktoren zu Uhrzeiten oder Ereignissen möglich.

Um die Tensorfaktoren zur Fehlererkennung zu nutzen, muss ein erwartetes Verhalten definiert werden, welches sich im fehlerfreien Betriebszustand in den Tensorfaktoren abbildet. Weicht dieses für einen Überprüfungszeitraum davon ab, so kann ein fehlerhafter Betrieb angenommen werden. Entscheidend für die Effizienz dieses Ansatzes ist die Struktur in den Messdaten und der gewählte Rang. Im ersten Beispiel wird das Vorgehen für den Betrieb eines Warmwasserbereiters gezeigt. In Abbildung 5.5-19 wird der vom Kunden gewünschte und eingestellte wöchentliche Betrieb in Stundenmittelwerten abgebildet. Die Nutzungszeiten sind Montag bis Freitag von 6 bis 23 Uhr, Samstag von 0 bis 14 Uhr sowie täglich eine Anti-Blockierschaltung der Pumpen um kurz vor Mitternacht. Die Tensorfaktoren - Abbildung 5.5-20 - wurden über einen Zeitraum von 6 fehlerfreien Wochen bestimmt. Die Werte des Rang 1 entsprechen dabei dem Betrieb am Wochentag, die des Rang 2 dem Betrieb am Samstag und der Rang 3 bildet die Anti-Blockierschaltung ab. Über den Wochenverlauf ändern sich die Werte wie erwartet nicht. Dieser Verlauf wird folglich als Referenz für die Fehlererkennung verwendet.

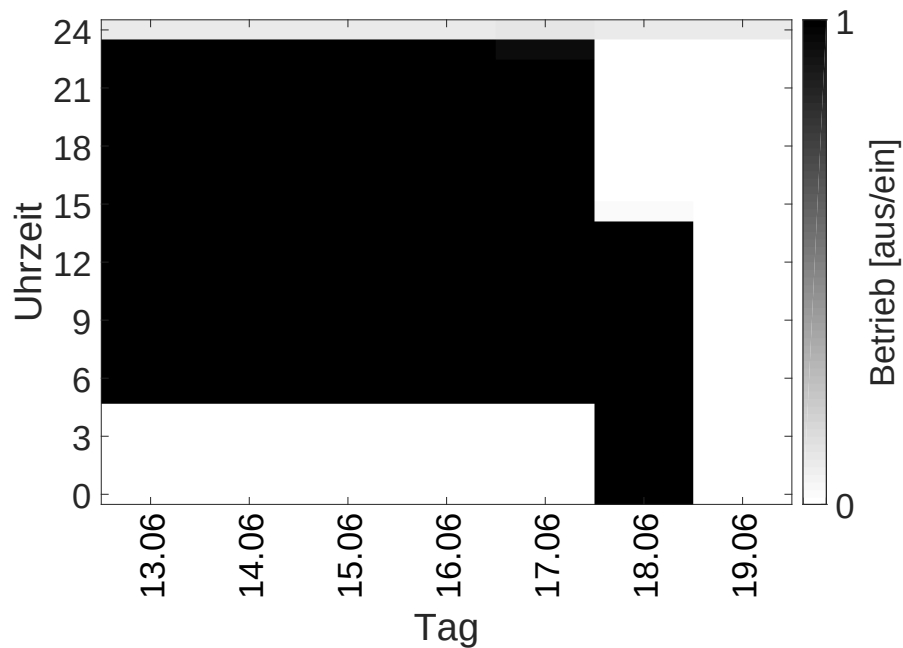


Abbildung 5.5-19: Pumpenbetrieb Warmwasserbereiter

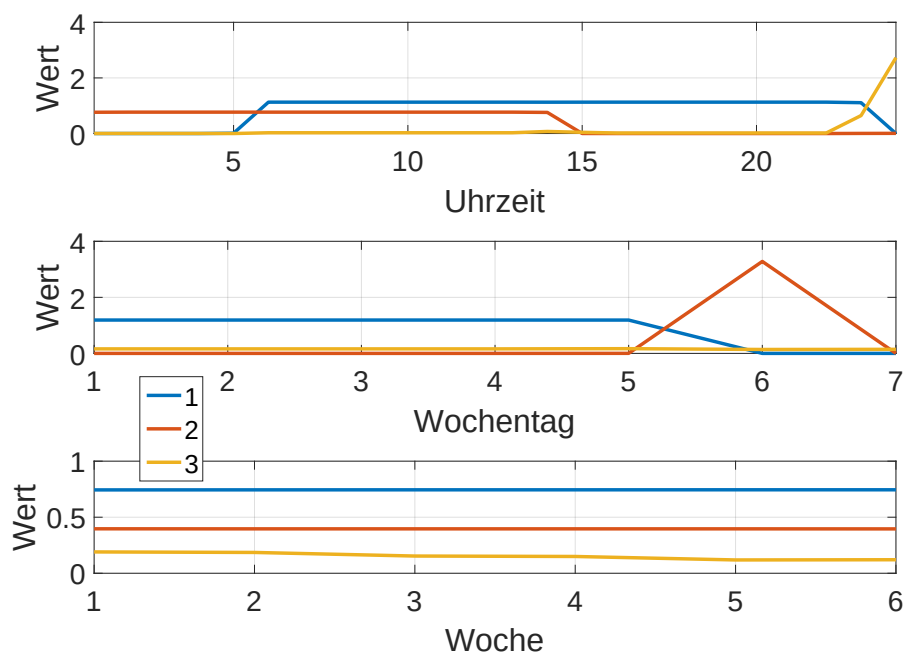


Abbildung 5.5-20: Tensorfaktoren für ordnungsgemäßen Betrieb

Im Herbst des betrachteten Jahres kam es zu Datenausfällen und Betriebsfehlern, siehe Abbildung 5.5-21. Somit sind für einige Tage die Daten komplett ausgefallen und für andere der Warmwasserbereiter durchgehend in Betrieb. Die Wochen 9 bis 17 des Datensatzes sind betroffen. In Abbildung 5.5-22 sind die Tensorfaktoren für den gesamten betrachteten Zeitraum abgebildet. Der Rang 1 bildet weiterhin tendenziell den Betrieb in der Woche tagsüber ab, allerdings wird noch ein Anteil vom Rang 2 hinzuaddiert. Der

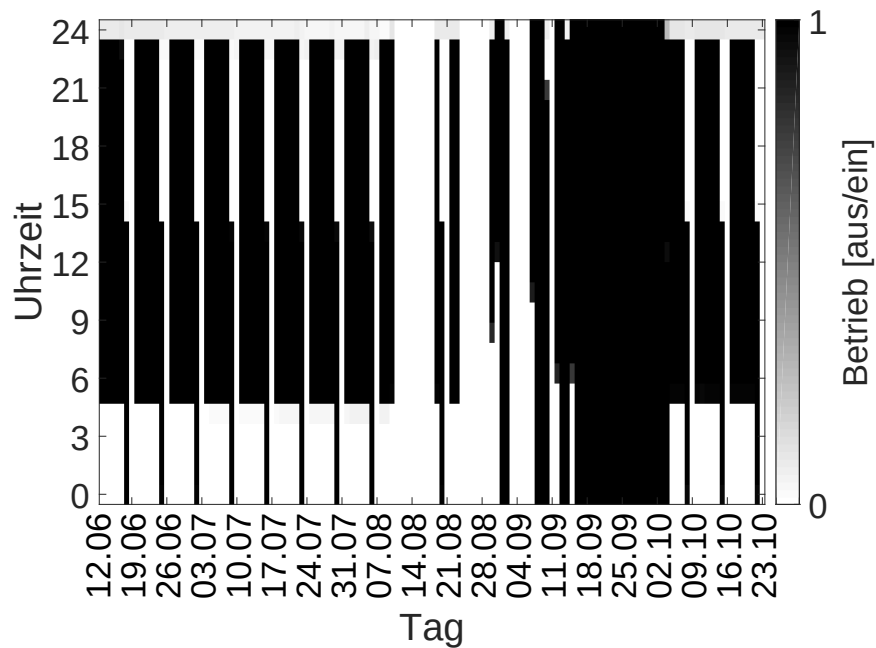


Abbildung 5.5-21: Pumpenbetrieb Warmwasserbereiter mit Fehler

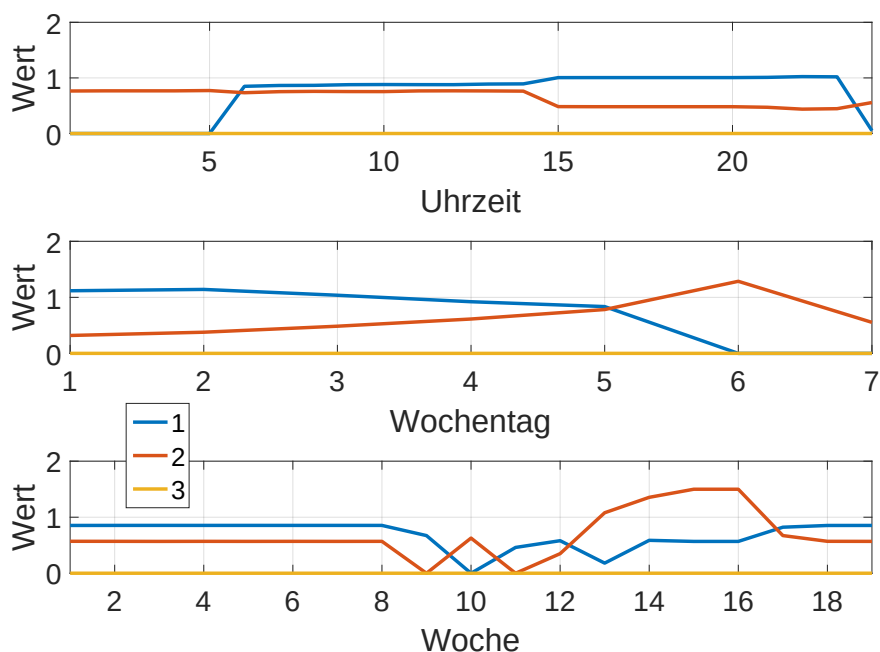


Abbildung 5.5-22: Tensorfaktoren für Betrieb mit Fehler

Rang 2 beschreibt einen großen Anteil des durchgehenden Betriebs während der Tage mit Betriebsfehler. Der Datenausfall und die Wochen mit Betriebsfehlern werden über die Faktoren für die Woche ausgedrückt. Die Anti-Blockierschaltung wird nicht mehr mit dem Rang 3 ausgedrückt, da bei der Optimierung der Faktoren die Abweichungen während der fehlerbehafteten Zeiten deutlich größer sind als die der Anti-Blockierschaltung und sie somit nicht ausreichend in die Kostenfunktion eingeht.

Das Betriebssignal des Warmwasserbereiters hat bei fehlerfreiem Betrieb eine perfekte Struktur, die gut mit einem Tensor 3. Ordnung abgebildet werden kann. Für Werte, die von äußeren Einflüssen abhängen besteht keine perfekte Struktur. In einem wei-

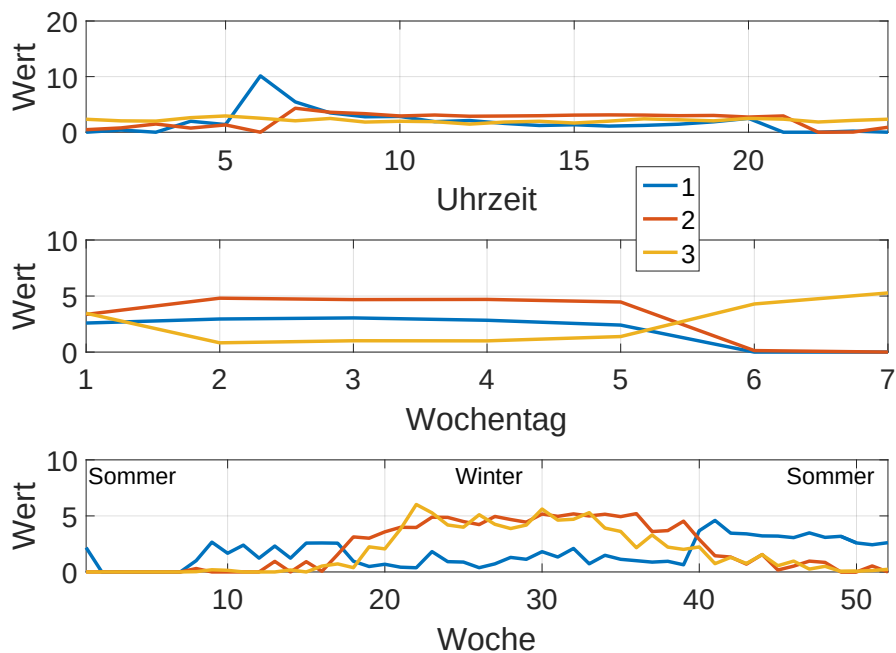


Abbildung 5.5-23: Tensorfaktoren für Heizkreis mit Absenkbetrieb, Rang 3

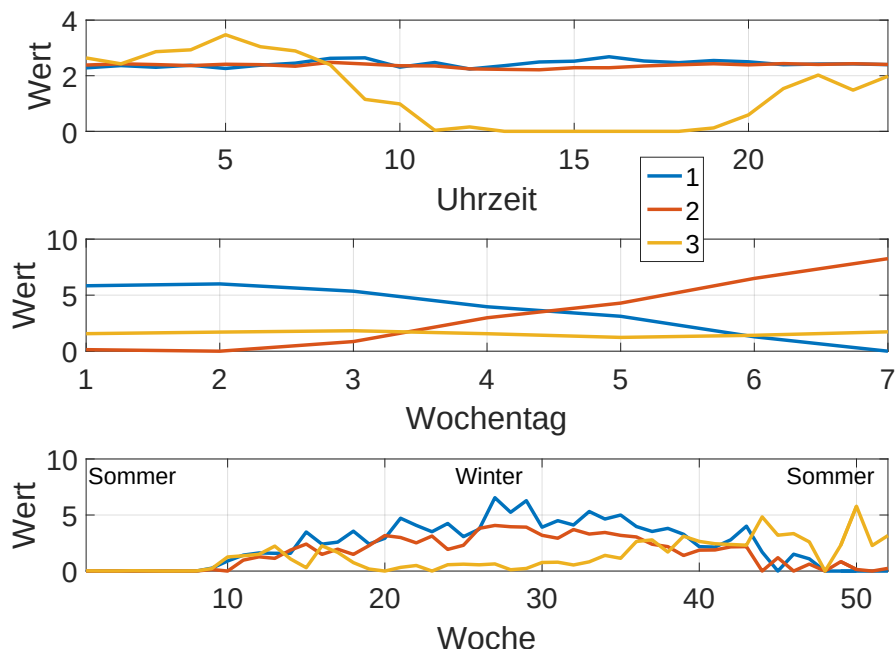


Abbildung 5.5-24: Tensorfaktoren für Heizkreis ohne Absenkbetrieb, Rang 3

teren Beispiel wird daher das Wärmeleistungssignal des am Anfang des Unterkapitels genannten Heizkreises verwendet. Der Referenzzeitraum wird von Sommer 2014 bis

Sommer 2015 gewählt. Die resultierenden Tensorfaktoren, Grafik 5.5-23, zeigen den - analog zu den Beobachtungen der Zerlegung des Signals des Stromzählers, Abbildung 5.5-17 - erwarteten Verlauf für eine Approximation mit dem Rang 3. Die Zeitumstellung ist aus den Daten ersichtlich, ebenso der veränderte Verbrauch an Wochenenden und die Nachtabenkung. Die ersten acht Wochen des Referenzzeitraums ist die Heizung außer Betrieb (Sommerabschaltung), und dadurch die Faktoren für diese Wochen 0. In den Faktoren des Rangs 3 sind das Verhalten am Wochenende und der für Montage anders gewählte Aufheizbetrieb enthalten. Rang 1 und 2 (rot und blau) sind gegenüber dem Beispiel des Stromzählers getauscht, was sich in den Startwerten der Faktormatrizen begründet.

Im Sommer 2015 wurde die Nachtabenkung für den betreffenden Heizkreis deaktiviert und in der Folge zeigen die für das Folgejahr berechneten Tensorfaktoren, Grafik 5.5-24, ein abweichendes Verhalten. Eine Änderung der Leistung über den Tagesverlauf ist nicht mehr erkennbar, und auch keine klare Trennung von Wochentag zu Wochenende. Durch das gleichbleibende Verhalten über den Tag ist auch die Zeitumstellung in den Faktoren nicht mehr erkennbar, da sie keine Auswirkungen auf die Betriebsdaten hat. Der Einfluss von Sonne und Fremdwärme ist in dem Anteil des Rangs 3 enthalten, der tagsüber auf Null zurückgeht. Die ersten neun Wochen des betrachteten Zeitraums ist die Heizung außer Betrieb (Sommerabschaltung), und dadurch die Faktoren für diese Wochen null.

Nachteil dieser Überprüfung ist es, dass für die Erkennung von Fehlern im Bereich der Heizungsanlagen ein längerer Zeitraum von Messdaten vorliegen muss, damit die Faktoren zuverlässig bestimmbar sind.

Es ist auch nicht möglich, anhand der mit dieser Tensorstruktur (*Stunde x Wochentag x Kalenderwoche*) und Referenzdaten bestimmten Tensorfaktoren einen aktuellen oder zukünftigen Messwert zu prüfen. Sie beziehen sich jeweils auf einen Zeitpunkt in der Vergangenheit, und den damaligen Nutzungseinflüssen und Umweltbedingungen. Eine der wichtigsten Störgrößen im Gebäudebereich ist die Außentemperatur, sie muss daher in vielen Fällen bei der Fehlererkennung berücksichtigt werden. Dadurch, dass die Außentemperatur einer kontinuierlichen Veränderung unterliegt, kann sie nicht sinnvoll direkt in das Raster eines Tensors eingepasst werden. Sie muss quantisiert werden. Dabei ergibt sich das Problem, dass für ein Element des resultierenden Tensors mehr als ein Wert vorliegen kann und für andere u.U. keine Werte erfasst werden. Ein Lösungsansatz dafür ist es bei mehrfachen Werten einen Mittelwert abzuspeichern und fehlende Werte über die Tensordekomposition anzunähern.

Dieses Vorgehen soll erneut an dem Beispiel der Wärmeleistung für den Heizkreis der Schule vorgestellt werden. Erwartet wird eine Abhängigkeit der Wärmeleistung von der Außentemperatur sowie von dem Wochentag und der Tageszeit. Die Wärmeleistung wird daher in einem Tensor mit der Struktur *Uhrzeit x Wochentag x Außentemperatur* abgespeichert. Die Außentemperaturwerte werden dabei für konstante Schritte, z.B. 2K, quantisiert. Datengrundlage sind die Betriebsdaten für 12 Monate, es werden mittlere Stundenwerte verwendet. Zeiträume mit bekannten Fehlern wurden aus den Referenzdaten entfernt. An den Positionen, für die mehrere Werte vorhanden sind, wird der Mittelwert genommen. Wenn ausreichend Werte für eine Position vorliegen, wird in einem weiteren Tensor die Varianz gespeichert um die Streuung der Leistung um ihren Mittelwert später beurteilen zu können. Ist ausreichend Information über das Anlagenverhalten im unvollständigen Tensor enthalten können die Lücken über Tensorzerlegung und Rückberechnung gefüllt werden. Der aus den Referenzdaten erstellte, unvollständige Tensor weist wie erwartet eine Struktur auf, in der z.B. für

niedrigere Außentemperaturen die Faktoren höher sind als für hohe Außentemperaturen. Allerdings kommt es aufgrund von Störgrößen zu einer Streuung der Werte, die bei der Tensorzerlegung einen Einfluss haben auf die Approximation der Bereiche, für die keine Messwerte vorliegen.

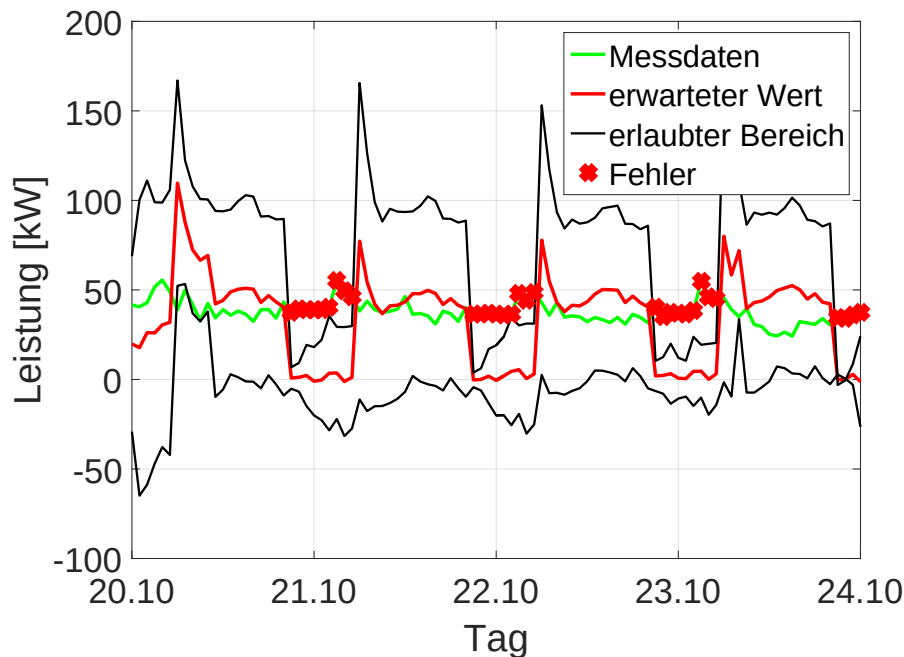


Abbildung 5.5-25: Vergleich von erwarteten zu gemessenen Leistungswerten

Zur Fehlererkennung kann nun ein erwarteter Leistungswert für den zu prüfenden Messwert anhand des Wochentag, der Uhrzeit sowie des Außentemperaturbereichs aus dem Tensor ausgelesen werden. Dieser wird mit dem gemessenen Wert verglichen. Als Fehlerkriterium wird die dreifache Standardabweichung genommen. Liegt der gemessene Wert über einen Zeitraum von drei Stunden außerhalb des Erwartungsbereichs, so wird ein Fehler angenommen, siehe Abbildung 5.5-25. Im Spätsommer wurde für den Heizkreis die Nachtabsenkung deaktiviert. In Abbildung 5.5-26 ist zu erkennen, wie nachts die gemessene Leistung über der erwarteten liegt. Ebenso weicht diese während der Morgenstunden nach unten ab, was fehlende Lastspitzen durch fehlende Aufheizphasen bedeutet. Das Ergebnis der Fehlererkennung ist in Abbildung 5.5-27 dargestellt. Der gesuchte Fehler wird erkannt. Die Zeiten in den Abbildungen 5.5-26 und 5.5-27 sind in mitteleuropäischer Zeit (MEZ) angegeben, die Anwendung der Methode fand mit Sommer- und Winterzeit statt damit die Aufheizung und das Abschalten des Heizkreises immer zur gleichen Tageszeit stattfinden.

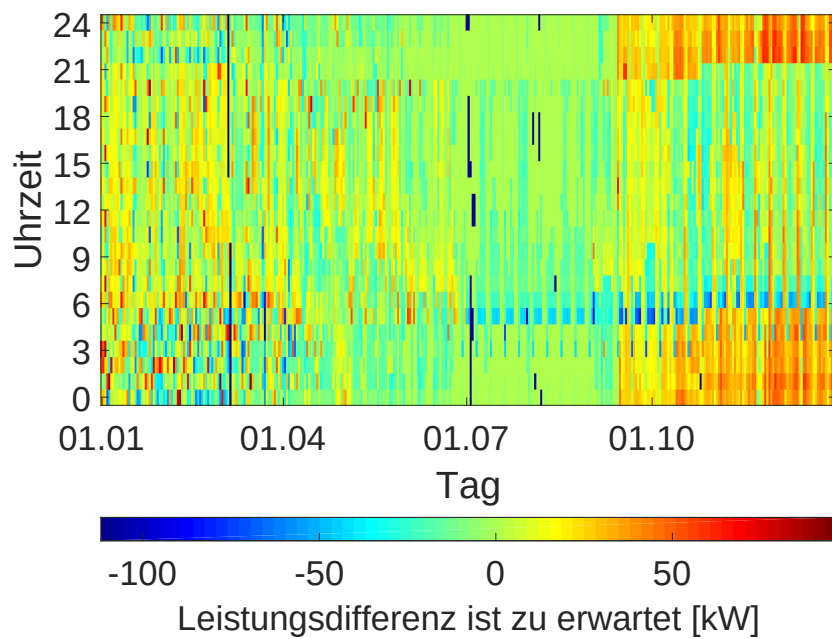


Abbildung 5.5-26: Abweichung der gemessenen und erwarteten Leistungswerte

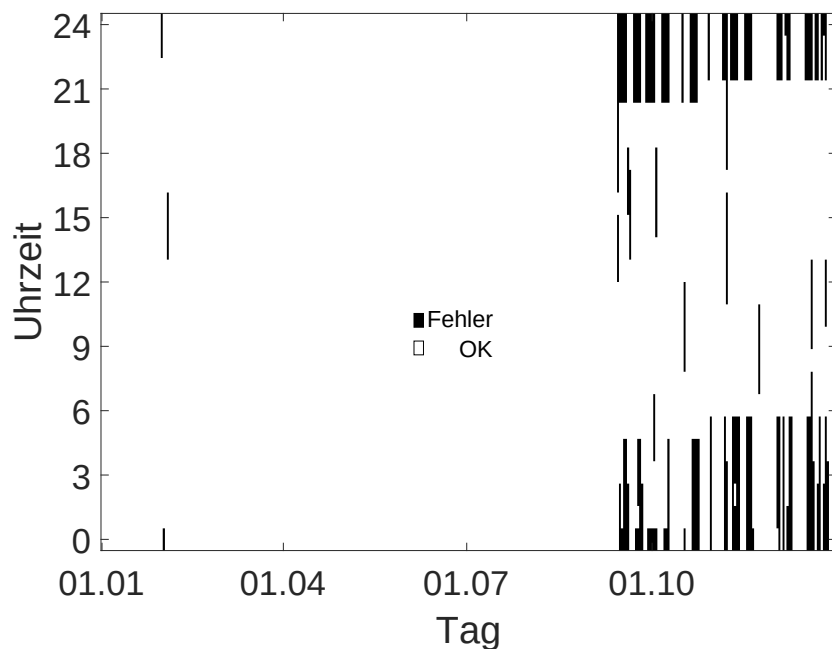


Abbildung 5.5-27: Fehlererkennung

Für ein weiteres Beispiel wird ein in dem Forschungsprojekt ModQS [46] erkannter und analysierter Fehler herangezogen. Für einen Mischkreis in einer Schule ist nach den Sommerferien bei vergleichbaren Betriebsbedingungen der Volumenstrom höher als vor den Ferien, siehe Abbildung 5.5-28. Auf Nachfrage in der Schule wurde mitgeteilt, dass in den Ferien in diesem Bereich eine Lüftungsanlage installiert wurde. Diese

wurde hydraulisch fehlerhaft eingebunden, so dass bei Betrieb der Heizkreispumpe ein Kurzschluss über die Lüftungsanlage vorliegt.

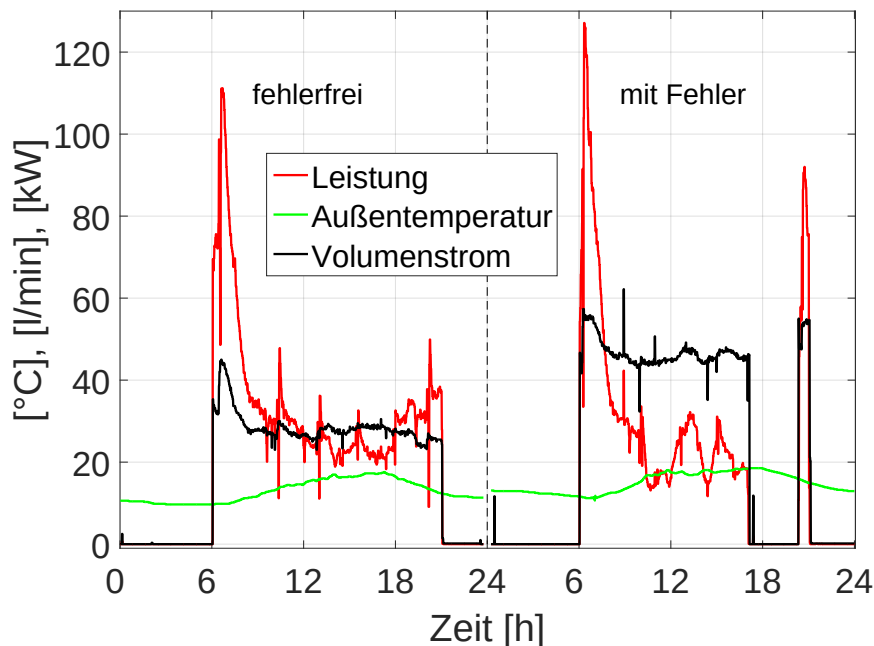


Abbildung 5.5-28: Fehlerhafte Nachrüstung einer Lüftungsanlage

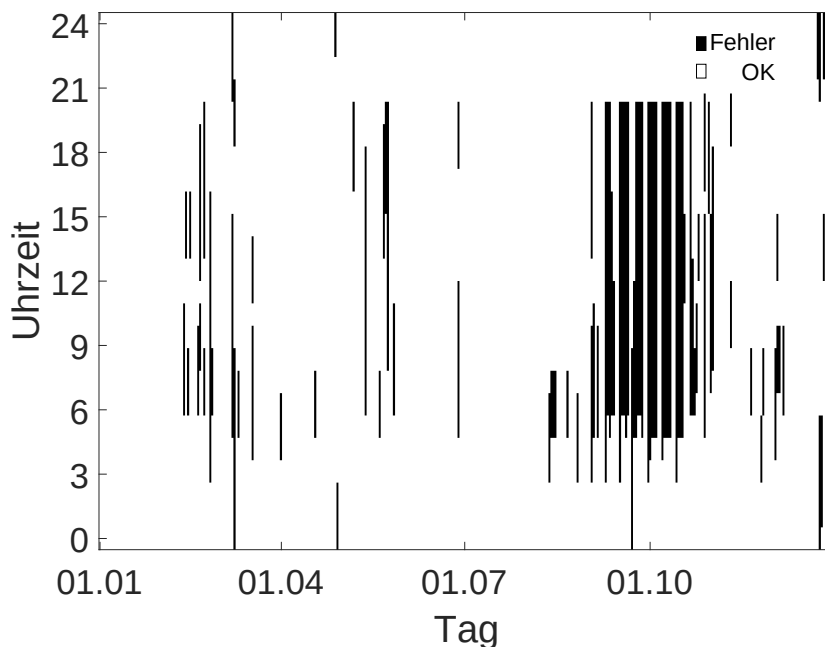


Abbildung 5.5-29: Fehlererkennung: RLT hydraulisch falsch eingebundenen

Zur Fehlererkennung wird für das oben beschriebene Vorgehen ein Tensor 3. Ordnung (*Wochentag* $\times$ *Uhrzeit (Stunde)* $\times$ *Außentemperaturfenster*) gebildet, in welchem der Volumenstrom gespeichert wird. Ein Jahresdatensatz mit Betriebsdaten vor dem Umbau wird zum Anlernen verwendet. Das Ergebnis der Fehlererkennung ist in 5.5-29

dargestellt, der Zeitraum im Herbst, in dem der Fehler bestand, wird korrekt erkannt. Der Fehler tritt tagsüber auf, da die Nachtabsenkung des Bereiches über eine Abschaltung der Pumpe und dem Schließen der entsprechenden Ventile erreicht wird und somit nur Wasser fließt, wenn einer der Bereiche des Heizkreises nachgeheizt wird. Es kommt zu Fehlalarmen. Die Trainingsdaten wurden nicht um die Zeiträume mit fehlerhaftem Betrieb (z.B. manuelle Sommerabschaltung der Heizkessel während die Heizkreispumpen weiter in Betrieb sind) bereinigt. Dies ist eine der Ursachen der Fehlalarme. Eine weitere Ursache für die Alarme ist, dass die Vorlauftemperatur nicht berücksichtigt wird. Bei einem - auf Erzeuger- bzw. Verteilerseite verursachten - Abfall der Vorlauftemperatur kann es zu Unterversorgung und in der Folge durch voll geöffnete Thermostatventile erhöhtem Volumenstrom durch die Heizkörper kommen.

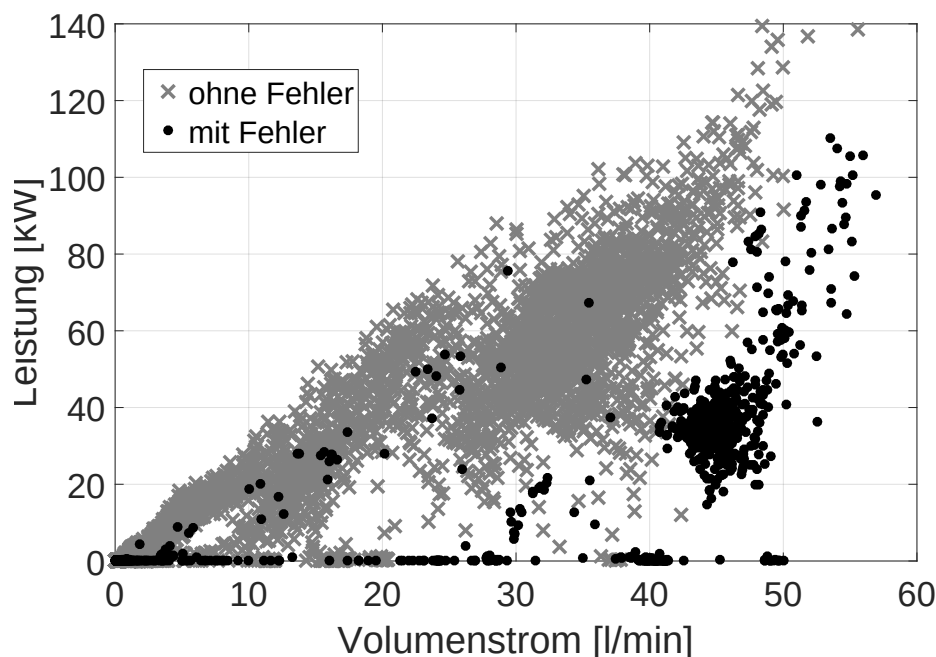


Abbildung 5.5-30: Wärmeleistung im Verhältnis zum Volumenstrom

Für diesen Fehler kann auch eine Erkennung mittels der Korrelation von Wärmeleistung und Volumenstrom verwendet werden, siehe Abbildung 5.5-30. Für den fehlerbehafteten Zeitraum liegen die Durchflusswerte ab einer Leistung von ca. 20kW außerhalb des Erwartungsbereiches, den man über die Messdaten des fehlerfreien Betriebs definieren würde. Die Zeitabhängigkeit ist bei der einfachen Kennwertbildung nicht betrachtet.

Die Fehlererkennung mittels Tensorzerlegung ist sensibel auf die Wahl der Temperaturfenster (oder allgemeiner der Intervalle der für die Tensorstruktur verwendeten Datenpunkte) und den gewählten Optimierungsalgorithmus für die Tensorzerlegung. Dies begründet sich unter anderem in der Datengrundlage, in der auch fehlerhafter Betrieb enthalten ist. So weichen Feiertage oder Ferienzeiten von der üblichen Wochentagsstruktur ab. Eine manuelle Sommerabschaltung, Nutzereinflüsse, außerplanmäßige Nutzung und Störgrößen beeinflussen die Datenstruktur. Die wichtigsten Faktoren, in den obigen Beispielen die Außentemperatur, müssen bekannt sein und in die Tensorstruktur einfließen. Bei zu starker Beeinflussung der Faktoren durch äußere Einflüsse, d.h. Fehler, Störgrößen oder bei falscher Wahl des Ranges werden für die unbekannten Einträge keine sinnvollen Werte errechnet. Eine Bereinigung der Anlerndaten um

die bekannten Fehler und Betriebsabweichungen resultiert in einer verbesserten Struktur im Datentensor und somit auch in weniger Streuung in den Tensorfaktoren. Die in Tabelle 5.5-19 genannten Fehler sind über die Analyse der Tensorfaktoren bzw. dem über die Tensorzerlegung vervollständigtem Kennfeld erkennbar.

Tabelle 5.5-19: Fehlerliste für Prüfung mit Tensorfaktoren

	Bezeichnung	Beschreibung / Beispiel
N1	Fehlende Nachtabenkung	Außerhalb der Nutzungszeiten: Raumtemperatur nicht abgesenkt
N2	Fehlende Wochenendabsenkung	Am Wochenende (für nicht genutzte Bereiche): Raumtemperatur nicht abgesenkt
N6	Betriebszeiten Warmwasserbereitung	Erlaubte Abschaltung von Zirkulation und Warmwasserbereitung wird nicht genutzt
D5	Zeitzone nicht in Zeitstempel enthalten	Umstellung zwischen Sommer- und Winterzeit nicht eindeutig
P11	Nachrüstung von Teilsystemen	Nachträglicher Einbau von fehlerhaften Komponenten oder fehlerhafte Einbindung (z. B. hydraulisch nicht abgeglichen)

5.5.6 Erkennung von Rauschen mit Frequenzanalyse

Durch eine Frequenzanalyse können Eigenschaften der betrachteten Signale festgestellt werden. Beispielweise mit der auf Fourier-Transformationen basierenden Spektralanalyse können die Arten der Frequenzkomponenten und ihre Verteilungen bestimmt werden. Sie wird unter anderem in der Schwingungsanalyse oder Sprachsignalverarbeitung verwendet. Die Frequenzanalyse wird in dieser Untersuchung auf Grund ihrer Komplexität nicht vertieft betrachtet. Es sollen nur Ansätze aufgezeigt werden, die im Zuge dieser Untersuchung aufgekommen sind.

So kann eine Frequenzanalyse für eine systematische Überprüfung von kontinuierlichen Messsignalen genutzt werden, wenn für die unterschiedlichen Arten der Messpunkte wie z.B. Außentemperatur, Raumtemperatur, Volumenstrom oder Vorlauftemperatur charakteristische Eigenschaften im Frequenzbereich definiert und die Messdaten darauf geprüft werden. Besonders im Zusammenhang mit einer standardisierten Datenpunktbezeichnung (angelehnt an DIN 6779-12) ergeben sich damit Möglichkeiten der automatisierten Prüfung.

Ein weiterer Ansatz ist die Identifikation von verrauschten Messsignalen, wie in den Abbildungen 5.5-31 und 5.5-32 (nach Fehlerbehebung) dargestellt. Für einen Teilbereich einer Hamburger Schule waren die Messdaten verrauscht. Die exakte Ursache ist unbekannt. Die Folge war erhöhter Verschleiß von Klappen und Ventilen, da die Regelung versucht hat, das Rauschen der Temperatursignale auszugleichen. Um verrauschte Signale zu erkennen, kann beispielsweise der Anteil des Rauschens gegen die eigentliche Nutzinformation des Signales verglichen werden. Das Cepstrum bezeichnet das Spektrum eines logarithmierten Frequenzspektrums (Fourierspektrums) eines Signals und beschreibt die Energie von periodischen Formen im Amplitudenspektrum. Es wird u.A. in der Schadensfrüherkennung von Maschinen oder zur Sprachanalyse genutzt. Durch Logarithmierung im Frequenzbereich gehen Multiplikationen z. B. eines Spektrums mit einem Frequenzgang in Additionen über und so können beispielsweise Auswirkungen von Echos vereinfacht unterdrückt werden.

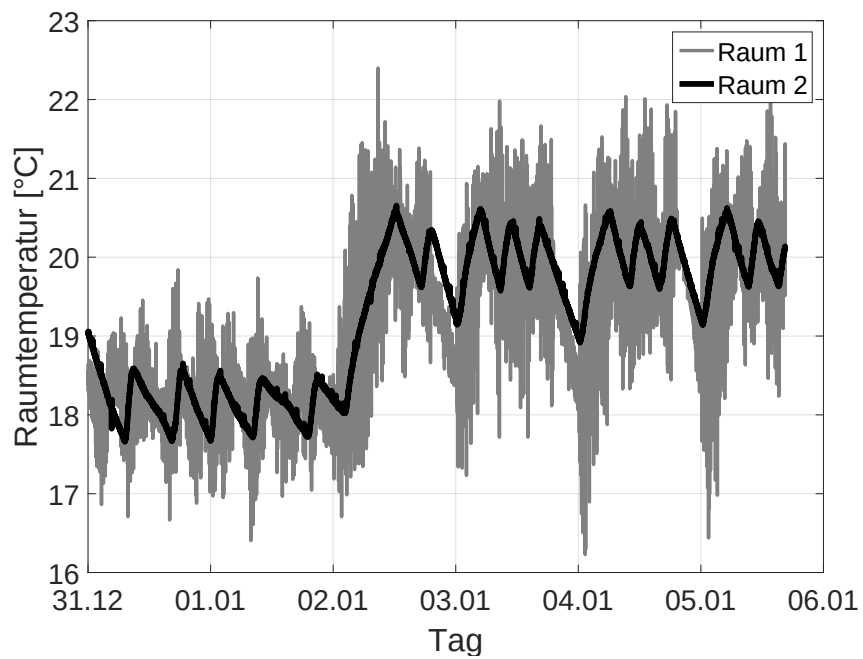


Abbildung 5.5-31: Raumtemperatur mit Rauschen

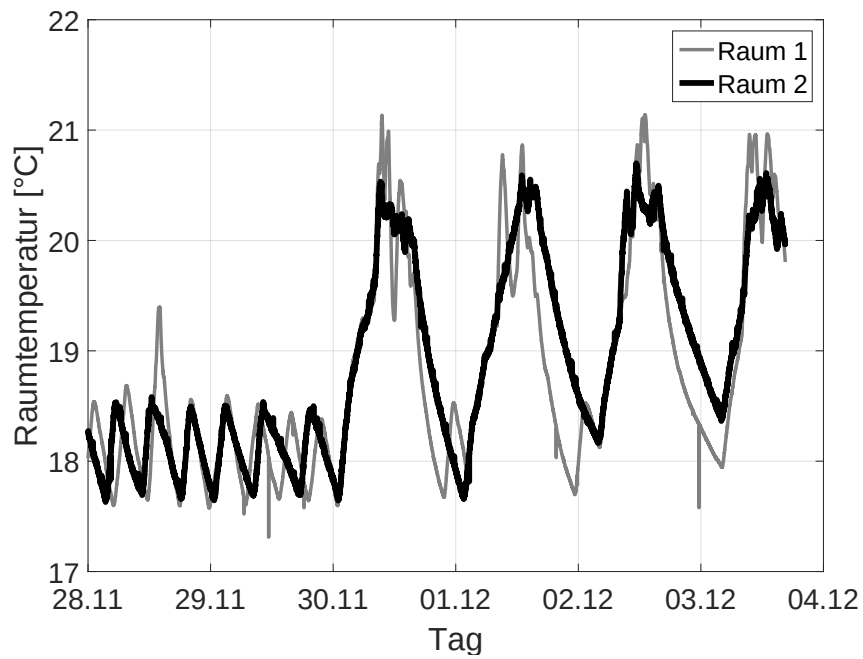


Abbildung 5.5-32: Raumtemperatur ohne Rauschen

In den Abbildungen 5.5-33 und 5.5-34 ist das Cepstrum für die in den Abbildungen 5.5-31 und 5.5-32 gezeigten Raumtemperaturen dargestellt. Der Wert bei 0 ist dabei die logarithmierte Gesamtenergie. Das Maximum der übrigen Werte zeigt die Grundfrequenz. Als Kennwert wird in diesem Beispiel das Verhältnis r der höchsten Frequenz zu der Streuung der Werte im niedrigen Frequenzbereich gebildet. Im Falle eines verrauschten Signals ist dieser Wert sehr klein im Verhältnis zu dem fehlerfreien Signalen.

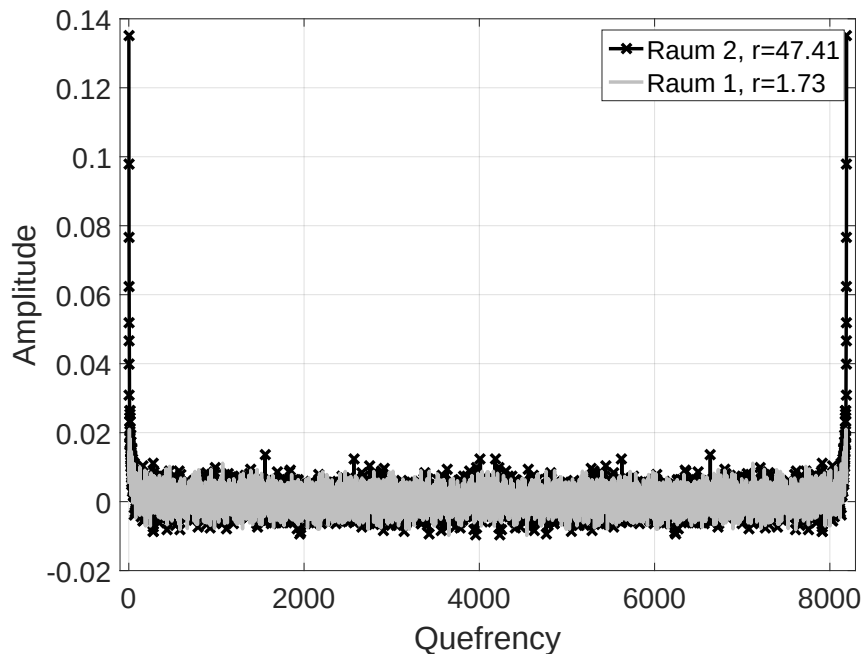


Abbildung 5.5-33: Cepstrum für Signal mit Rauschen

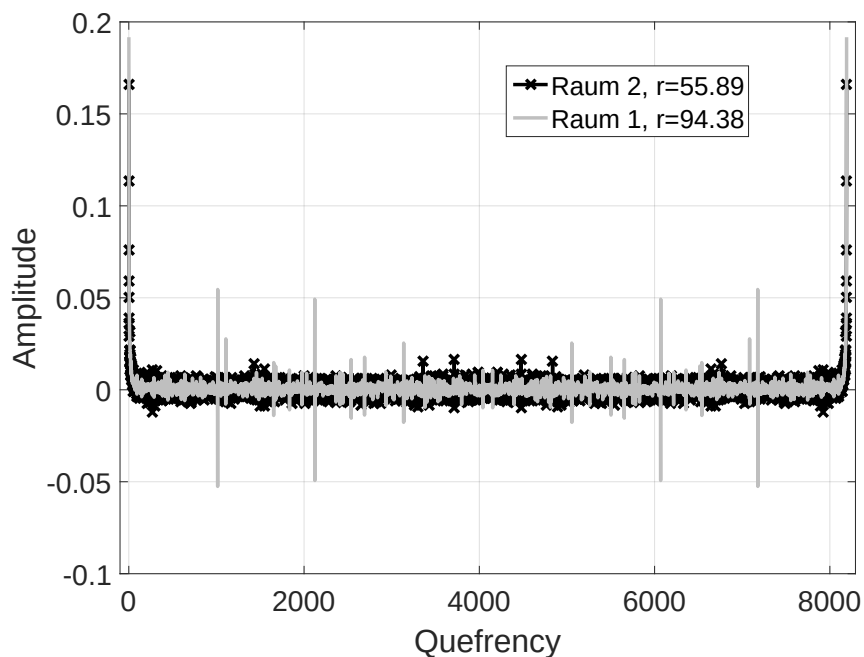


Abbildung 5.5-34: Cepstrum für Signale ohne Rauschen

5.6 Anwendungsbeispiele modellbasierter Methoden

Kapitel 5.3.1.3 stellt modellbasierte Methoden zur Fehlererkennung vor, Kapitel 5.3.2 die für die Anwendung notwendige Modellbildung. Das folgende Kapitel zeigt die praktische Anwendung, teilweise unter Nutzung der in Kapitel 5.3.3 eingeführten Tensorzerlegung. Es wird eine Verknüpfung zu der in Anhang B aufgeführten Fehlerliste hergestellt. Ausgewählte Praxisbeispiele zeigen die Potentiale und Herausforderungen. Schwerpunkt des Kapitels bilden multi-lineare Modelle und Verbrauchermodele, die auf physikalischer Modellbildung mit einem Grey-Box-Ansatz basieren.

5.6.1 Fehlererkennung mit multi-linearen Modellen

Die Schwierigkeit der modellbasierten Fehlererkennung liegt in der Verfügbarkeit geeigneter Modelle. Eine der Hauptherausforderungen in der Modellbildung ist das Abbilden der in Kapitel 5.2 angesprochenen Nichtlinearität der Systeme. Das nichtlineare Verhalten wird in diesem Abschnitt über eine Mehrzahl von linearen Zustandsraummodellen angenähert, indem ein multi-lineares Modell gebildet wird [50]. Zu beachten ist, dass multi-linear (mit Bindestrich) multiple lineare Modelle bezeichnet, während multilinear (ohne Bindestrich) Modelle bezeichnet, in denen Multiplikationen von Eingangsgrößen und Zuständen - und allen Kombinationen mit allen Multiplikatoren - zulässig sind.

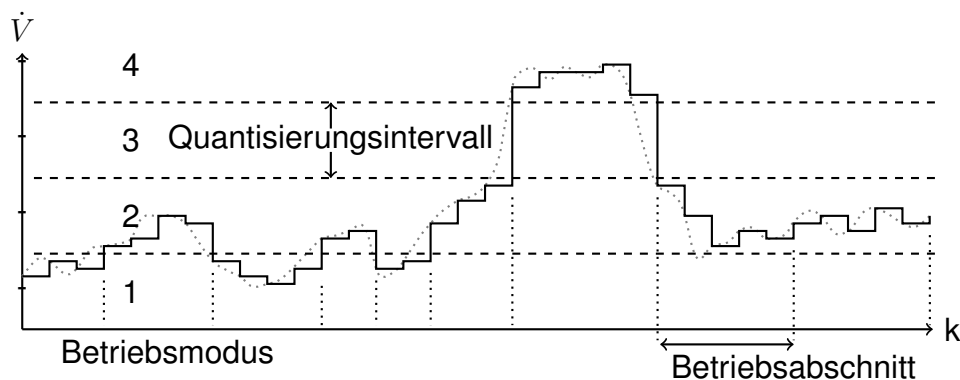


Abbildung 5.6-1: Quantisierung und Begriffsdefinition

Hält man in den multilinearen Termen alle der wertekontinuierlichen Signale außer einem konstant und wählt nur Daten mit einer gleichbleibenden Kombination der binären Signale, so erhält man ein lineares Verhalten. Für jede Kombination aus den quantisierten und binären Signalen, genannt Betriebsmodus [36], kann ein lineares, zeitinvariantes System um einen Arbeitspunkt identifiziert werden. Die zu quantisierenden Signale werden Partitionierungssignale genannt. Die Identifikation der Systemparameter kann mit Standardtechniken wie dem N4SID Algorithmus [52] erfolgen. Dafür werden die Ein- und Ausgangsgrößen in die durch die Partitionierungssignale zuvor bestimmten Bereiche eingeteilt. In Abbildung 5.6-1 sind die Begriffe und deren Zuordnung für ein einfaches Beispiel mit einem kontinuierlichen Signal dargestellt. Sie zeigt die Bestimmung der Betriebsmodi anhand eines Volumenstroms. Abbildung 5.6-2 zeigt die Einteilung eines Temperatursignals in die aus dem Volumenstromsignal bestimmten Betriebsmodi. Sind die zeitlich zusammenhängenden Daten eines Betriebsmodus

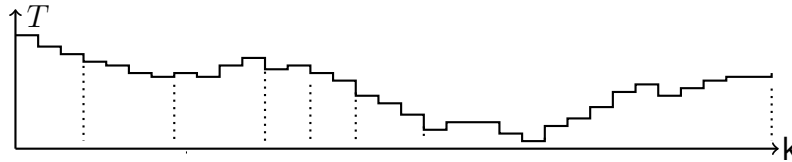


Abbildung 5.6-2: Quantisierung von Ein- und Ausgangsgrößen

zu lang, um sie z. B. mit Paritätsgleichungen weiterzuverarbeiten, so wird der betreffende Zeitraum in Betriebsabschnitte unterteilt. Durch die Quantisierung kommt es zu Ungenauigkeiten in der Modellbildung, die im wesentlichen von der Größe des Quantisierungsintervalls abhängen.

In Kapitel 5.2 wurde herausgearbeitet, welche Fehler häufig in Heizungsanlagen vorkommen und große Auswirkungen auf den Anlagenbetrieb haben. Für die Erprobung und Anwendung von modellbasierten Methoden werden aus dieser Liste der Kesselbetrieb und der Betrieb von Mehrkesselanlagen gewählt. Fehler in diesem Bereich wirken sich stark auf die Versorgungssicherheit aus und es sind viele Betriebsdaten für fehlerfreien und fehlerhaften Betrieb verfügbar. Im folgenden wird die Modellbildung gezeigt, und wie die Vorteile der Tensorstruktur und der Tensordekomposition genutzt werden können, um die Handhabung des multi-linearen Modells und die Fehlererkennung zu verbessern.

Systemdefinition

Der Betriebsmodus $\mathbf{I}$ ist definiert durch die Kombination von binären Signalen (z. B. an/aus, auf/zu) und den Mittelpunkten der Quantisierungsintervalle für die kontinuierlichen Partitionierungssignale (z. B. Temperaturen, Volumenströme). Der Betriebsmodus ist über den Indexvektor

$$\mathbf{I} = (i_1, i_2, \dots, i_v) \quad (5.6.1)$$

definiert mit $i_n = \{1, 2, \dots, I_n\}$, $n = 1, 2, \dots, v$. Die Anzahl der Quantisierungsintervalle der dazugehörigen Signale ist I_n , $n = 1, 2, \dots, v$. Für binäre Signale gilt $I_n = 2$, dabei wird 0 dem Index 1 und 1 dem Index 2 zugeordnet. Die Intervalle $J_1, \dots, J_j$ werden für die Quantisierung der kontinuierlichen Signale, die den Betriebsmodus beschreiben, verwendet. Dieser Index ist gleichzeitig der entsprechende Index im Indexvektor $\mathbf{I}$. Auch die Grenzen der Intervalle werden in einer gesonderten Variable gespeichert. Zur Veranschaulichung ein Beispiel: für ein System, dessen Betriebsmodus über ein in fünf Intervalle aufgeteiltes kontinuierliches Signal und ein binäres Signal definiert werden, ist der Indexvektor $\mathbf{I} = (i_1, i_2)$ mit $i_1 \in \{1, \dots, 5\}$ und $i_2 \in \{1, 2\}$.

Für jeden Betriebsmodus wird eine Linearisierung durchgeführt. Das Ergebnis ist ein diskretes, zeitinvariantes Zustandsraummodell

$$\mathbf{x}(k+1) = \mathbf{A}_{\mathbf{I}}\mathbf{x}(k) + \mathbf{B}_{\mathbf{I}}\mathbf{u}(k) \quad (5.6.2)$$

$$\mathbf{y}(k) = \mathbf{C}_{\mathbf{I}}\mathbf{x}(k) + \mathbf{D}_{\mathbf{I}}\mathbf{u}(k) \quad (5.6.3)$$

in dem k den Zeitindex, $\mathbf{I}$ den Betriebsmodus, $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^n$ den Zustandsvektor, $\mathbf{u} \in \mathbb{R}^m$ die Eingangsgrößen, $\mathbf{y} \in \mathbb{R}^p$ die Ausgangsgrößen, $\mathbf{A}_{\mathbf{I}} \in \mathbb{R}^{n \times n}$ Systemmatrix, $\mathbf{B}_{\mathbf{I}} \in \mathbb{R}^{n \times m}$ die Steuermatrix, $\mathbf{C}_{\mathbf{I}} \in \mathbb{R}^{p \times n}$ die Beobachtungsmatrix und $\mathbf{D}_{\mathbf{I}} \in \mathbb{R}^{p \times m}$ die Durchgangsmatrix beschreiben, siehe auch Kapitel 5.3.2.2. Die $\mathbf{A}$, $\mathbf{B}$, $\mathbf{C}$, und $\mathbf{D}$ Matrizen müssen dabei in der kanonischen Zustandsraumdarstellung sein, um die Vergleichbarkeit zwi-

schen den Betriebsmodi zu ermöglichen. Die Darstellungsweise aus (5.6.4) wird verwendet, um die gesamte Information eines Zustandsraummodells in einer einzigen Matrix abzuspeichern, die Dimension dieser Matrix ist $\mathbb{R}^{(n+p) \times (n+m)}$. Dabei sind in (5.6.4) die Elemente von A, B, C, und D in der Modalform (Diagonalform) ausgedrückt. Ein direkter Durchgang der Eingangs- auf die Ausgangsgrößen ist je nach betrachtetem System und Modellstruktur über den Volumenstrom möglich. In den Anwendungsbeispielen dieser Arbeit gibt es keinen direkten Durchgang, somit wird D als Nullmatrix betrachtet.

$$\left(\begin{array}{c|c} \mathbf{A} & \mathbf{B} \\ \hline \mathbf{C} & \mathbf{D} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{cccc|cccc} a_{11} & 0 & \dots & 0 & b_{11} & \dots & \dots & b_{1m} \\ 0 & a_{22} & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & 0 & \vdots & & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 & a_{nn} & b_{n1} & \dots & \dots & b_{nm} \\ \hline c_{11} & \dots & \dots & c_{1n} & 0 & \dots & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & & \vdots & \vdots & \ddots & & \vdots \\ \vdots & & \ddots & \vdots & \vdots & & \ddots & \vdots \\ c_{p1} & \dots & \dots & c_{pn} & 0 & \dots & \dots & 0 \end{array} \right) \quad (5.6.4)$$

Um das komplette multi-lineare System, d.h. ein lineares System für jede Kombination der v Signale, die die Betriebsmodi definieren, abzubilden, wird der Parametertensor M

$$\mathbf{M} \in \mathbb{R}^{(n+p) \times (n+m) \times I_1 \times I_2 \times \dots \times I_v} \quad (5.6.5)$$

angelegt. Die Einträge von der dritten zu der $v+2$. Dimension von M entsprechen dem Betriebsmodus I. Mit konstanten Werten für alle außer den ersten zwei Dimensionen bekommt man die $\left(\begin{array}{c|c} \mathbf{A} & \mathbf{B} \\ \hline \mathbf{C} & \mathbf{D} \end{array} \right)$ Matrix des linearen Systems, welches das Verhalten für

den Betriebsmodus I beschreibt. Die Matrixstruktur $\left(\begin{array}{c|c} \mathbf{A} & \mathbf{B} \\ \hline \mathbf{C} & \mathbf{D} \end{array} \right)$ wird trotz der großen Anzahl von Nullen in A und D beibehalten um die generische Systembeschreibung zu behalten und ggf. für neue Anforderungen weiterverwenden zu können. Die Linearisierung wird um den Arbeitspunkt vorgenommen, dessen Werte für die Eingänge und Ausgänge auch gespeichert werden müssen. Diese Werte befinden sich aber nicht in der selben Größenordnung wie die Parameter des Zustandsraummodells und können aufgrund der Anzahl der Elemente auch nicht an die Dimension $\mathbb{R}^{(n+p) \times (n+m)}$ angepasst werden. Sie passen somit nicht in den Tensor M. Daher werden die Werte der Arbeitspunkte für die Eingänge und Ausgänge $\bar{\mathbf{u}}_I$ und $\bar{\mathbf{y}}_I$ in dem zusätzlichen Tensor O

$$\mathbf{O} \in \mathbb{R}^{(m+p) \times I_1 \times I_2 \times \dots \times I_v} \quad (5.6.6)$$

mit $\mathbf{O}(:, \mathbf{I}) = [\bar{\mathbf{u}}_I \quad \bar{\mathbf{y}}_I]^T$ abgelegt.

Identifikation der Parametersätze

Im ersten Schritt werden die Betriebsdaten für die Eingänge, Ausgänge und die die Betriebsmodi definierenden Signale eingelesen. Je nach Datenqualität ist es notwendig, die Daten mit einer Ausreissererkennung oder dem Auffüllen von Datenlücken vorzubereiten. Die Anlern Daten sollten frei von Betriebsfehlern sein, da diese sonst in den

Modellen abgebildet werden. Durch Quantisierung werden die Werte der Partitionierungssignale in Intervalle eingeteilt. Die Intervallgrenzen werden gespeichert und während der Fehlererkennung verwendet. Daraufhin werden die Betriebsmodi erkannt und die Daten nach Modi sortiert. Für jeden Betriebsmodus werden die Werte des Arbeitspunktes für Ein- und Ausgänge in O gespeichert.

Die Parameteridentifikation geschieht mit dem N4SID-Algorithmus in MATLAB. Störgrößen werden nicht bestimmt, die Werte werden auf Null fixiert. Die kanonische Normalform des Zustandsraummodells wird erreicht über den MATLAB Befehl `canon` mit der Option `modal`, welcher das lineare Modell entsprechend umformt. Allerdings werden hierbei die Einträge für B und C nicht normiert, weshalb die Einträge von C , die nicht Null sind, im Nachgang auf f_T normiert werden. Algorithmen für Tensoren reagieren sensitiv auf die Größenordnung der Datenelemente [10], daher muss f_T so gewählt werden, dass alle resultierenden Einträge in der gleichen Größenordnung liegen. Die Formeln für die Umformung sind in (5.6.7) bis (5.6.11) beschrieben.

$$\mathbf{T}_{\text{norm}} = f_T \begin{pmatrix} \frac{1}{c_{11}} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \frac{1}{c_{12}} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \frac{1}{c_{1n}} \end{pmatrix} \quad (5.6.7)$$

$$\mathbf{A}_{\text{norm}} = \mathbf{T}_{\text{norm}}^{-1} \mathbf{A} \mathbf{T}_{\text{norm}} \quad (5.6.8)$$

$$\mathbf{C}_{\text{norm}} = \mathbf{C} \mathbf{T}_{\text{norm}} \quad (5.6.10)$$

$$\mathbf{B}_{\text{norm}} = \mathbf{T}_{\text{norm}}^{-1} \mathbf{B} \quad (5.6.9)$$

$$\mathbf{D}_{\text{norm}} = \mathbf{D} \quad (5.6.11)$$

Um die Lesbarkeit zu verbessern, wird in der weiteren Betrachtung davon ausgegangen, dass die Matrizen A , B , C , und D in M in der normierten Form abgelegt werden, ohne dass der Index *norm* explizit erwähnt wird.

Erstellen des kompletten Parametertensors

Bei Systemen oder Teilsystemen mit diversen binären und / oder quantisierten Signalen, welche die Betriebsmodi bestimmen, ist es sehr wahrscheinlich, dass für einige Betriebsmodi keine Betriebsdaten vorliegen. Daher können die Tensoren (5.6.5) und (5.6.6) unbekannte Einträge haben. In Abbildung 5.6-3 ist ein Schema für einen un-

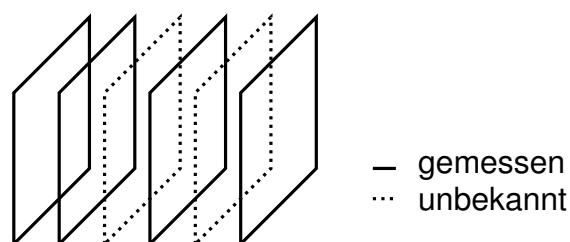


Abbildung 5.6-3: Unvollständiger Parametertensor

vollständigen Tensor mit einem Partitionierungssignal dargestellt. Vierecke mit durchgezogenen Linien bedeuten, dass die Matrix $\begin{pmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{B} \\ \mathbf{C} & \mathbf{D} \end{pmatrix}$ für diese Betriebsmodi aus Messdaten bestimmt werden können, die übrigen Parametersätze fehlen. Um diese zu bestimmen wird ein Vorgehen gewählt, dass die Tensordekomposition, beschrieben in Kapitel 5.3.3, verwendet. Die Betriebsmodi sind voneinander abhängig. Die Änderung von einem Partitionierungssignal hat ähnliche Auswirkungen für alle betroffenen

Betriebsmodi, was sich in den Tensorfaktoren abbildet. Wichtig ist hierbei, dass die Systemdynamik für die Bereiche, in denen das Modell genutzt wird, in den Anlerndaten enthalten ist. Sollte beispielsweise ein binäres Signal für den gesamten Datenbereich den Wert 0 haben, so kann keine Aussage darüber getroffen werden, was passiert, wenn dieses Signal auf 1 geschaltet wird. Fehlen aber einzelne Bereiche für ein quantisiertes Signal, die Dynamik ist aber in den übrigen Bereichen enthalten und wird der Rang richtig gewählt, so können diese Lücken gefüllt werden, siehe Gleichung (5.3.39). Fehlerhafte Parameter einzelner Betriebsmodi beeinflussen die Struktur der Daten der Tensorzerlegung und somit die Nutzbarkeit des kompletten Parametertensors. Um die fehlenden Einträge der Tensoren M und O zu bestimmen, wird die *Tensorlab Toolbox* für MATLAB [57] genutzt. Die Wahl des Ranges entscheidet über die Genauigkeit der Näherungslösung. Je höher der Rang gewählt wird, desto höher werden die Freiheitsgrade für die unbekannten Einträge, siehe (5.3.41) und (5.3.42). Ein zu niedriger Rang erlaubt keine ausreichende Anpassung an die in den Messdaten enthaltene Systemdynamik (5.3.38). Der Rang wird heuristisch bestimmt. Für die Tensorzerlegung wird der *cpd* Algorithmus der *Tensorlab Toolbox* genutzt, für den die Option *CPDI* eingeschaltet wird, um die spezielle Optimierung für unvollständige Tensoren, beschrieben in Gleichung (5.3.33), zu aktivieren.

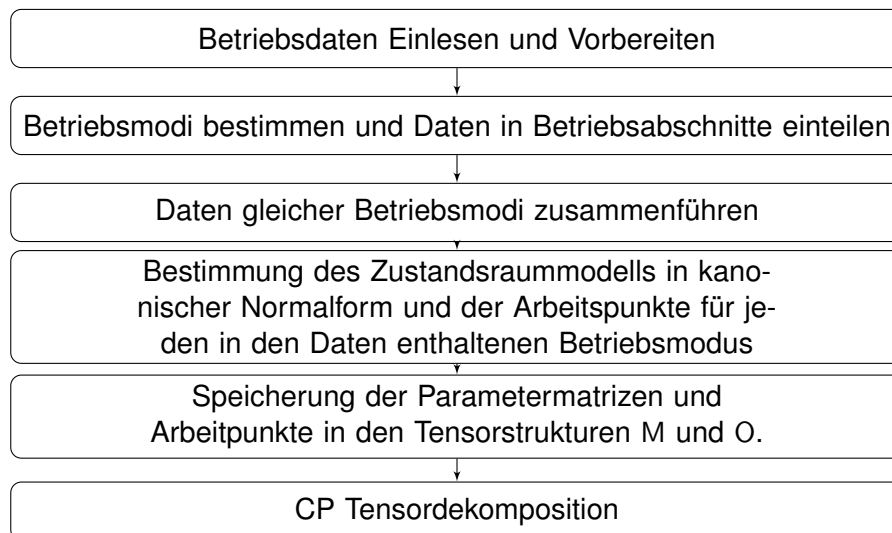


Abbildung 5.6-4: Erzeugen des Parametertensors

Abbildung 5.6-4 stellt dar, wie der Parametertensor, der das Systemverhalten für jeden Betriebsmodus beinhaltet, erzeugt werden kann.

Fehlererkennung mit Paritätsgleichungen

Die vorgestellte Methodik wird für offline Fehlererkennung mit Paritätsgleichungen verwendet. In Abbildung 5.6-5 wird das Vorgehen zusammengefasst. Der Parametertensor M beschreibt das Nominalverhalten, d.h. das fehlerfreie Verhalten. Für jeden Betriebsabschnitt wird das Residuum $r(k)$ mittels Paritätsgleichungen berechnet und gegen eine obere und untere Fehlergrenze, b_o und b_u , verglichen. Bei Überschreitung dieser Grenzen liegt ein Fehler vor. Die Grenzen werden bestimmt, indem das Residuum r auch für den fehlerfreien Betrieb, mit dem das Modell angelernt wurde, berechnet wird. Mit ihm kann die Güte des Modells und ein erwarteter Wertebereich des Residuums abgeschätzt werden. Gleichzeitig ist es nur möglich, Fehler zu erkennen, die eine größere Auswirkung auf das Residuum haben als Ungenauigkeiten und Störungen bei der Modellbildung. Die Grenzwerte sind für jeden Betriebsmodus I gleich.

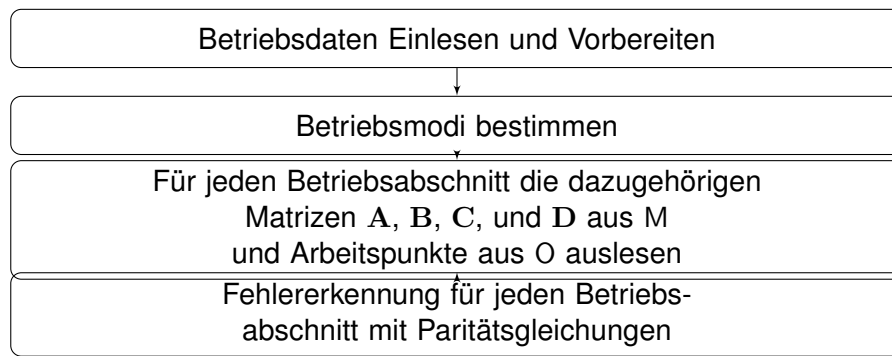


Abbildung 5.6-5: Fehlererkennung

Anwendungsbeispiel

Die Methodik wird an realen Messdaten einer Heizungsanlage angewandt. Die Wärmeerzeugung der Beispielanlage erfolgt über drei hydraulisch abgeglichenen Kessel mit den dazugehörigen Gasbrennern. Die Wärme wird in sechs Verbraucherkreisen genutzt. Die Heizungsanlage wurde schon im Forschungsprojekt ModQS vertieft betrachtet [49, 43]. Das Schema der Wärmeerzeugung ist in Abbildung 5.6-6 dargestellt.

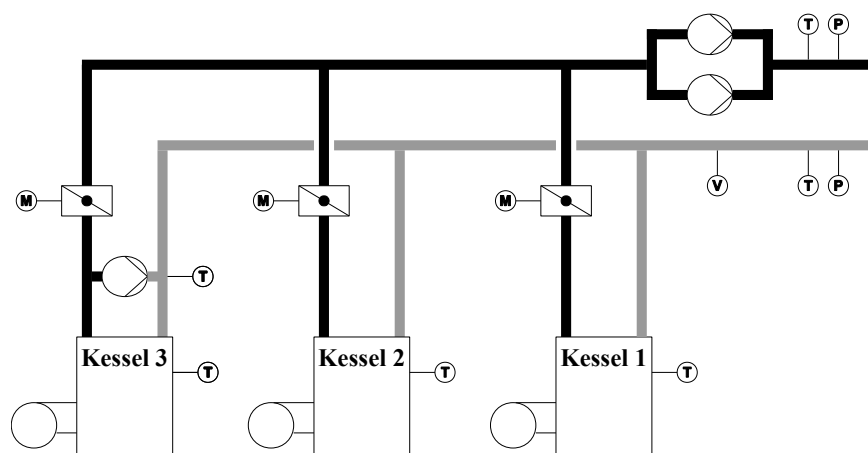


Abbildung 5.6-6: Schema der Mehrkesselanlage

Jeder Kessel ist mit einer Klappe ausgerüstet, so dass der Volumenstrom durch den Kessel gestoppt werden kann, wenn der dazugehörige Brenner außer Betrieb ist. Kessel 2 hat die vereinfachte Energiebilanz

$$c_w \rho V_{VL2} \dot{T}_{VL2}(t) = \dot{Q}_2(t) + c_w \rho \dot{V}_2(t) (T_{RL}(t) - T_{VL2}(t)). \quad (5.6.12)$$

Die Eingangsgrößen für den Kessel 2 sind die Rücklauftemperatur T_{RL} und die Leistungsvorgabe für den Brenner $\dot{Q}_2$. Die Ausgangsgröße ist die Vorlauftemperatur T_{VL2} . Auch der Zustand des Systems entspricht der Vorlauftemperatur des Kessels, somit ist $C = 1$. Die Betriebsmodi werden definiert durch das Betriebssignal des Brenners (an/aus) und den Volumenstrom. Dadurch, dass die Hauptversorgung der Anlage über den Kessel 2 geschieht, ist er ständig durchflossen und keine Trainingsdaten für eine geschlossene Klappe verfügbar, die Klappenstellung kann daher nicht in die Betriebsmodi eingehen. Der Volumenstrom ist in sieben Intervalle eingeteilt.

Für jedes dieser Intervalle und jeden Brennermodus werden die Systemparameter mittels Black-Box Identifikation (MATLAB *System Identification Toolbox*) bestimmt. Der resultierende Parametertensor M hat die Dimension $\mathbb{R}^{2 \times 3 \times 7 \times 2}$, der Index für die Betriebsmodi ist $I_b = (i_1, i_2)$ mit $i_1 \in \{1, \dots, 7\}$ und $i_2 \in \{1, 2\}$. Der Parametertensor wird mit Trainingsdaten von sechs Monaten berechnet. 13 der 14 möglichen Betriebsmodi sind enthalten. Die Elemente des Parametertensors, die den A Matrizen – in diesem Fall Skalare, da es ein System erster Ordnung ist – zugeordnet werden können, werden in (5.6.13) gezeigt. Hierbei wird der fehlende Modus mit * markiert. Die sieben Elemente der ersten Dimension entsprechen den sieben Intervallen des Volumenstroms und die zwei Elemente in der zweiten Dimension entsprechen dem Brennerbetriebsmodus.

$$M(1, 1, :, :) = \begin{bmatrix} 1.00 & 0.89 \\ 0.81 & 0.76 \\ 0.82 & 0.77 \\ 0.68 & 0.75 \\ 0.96 & 0.69 \\ 0.57 & 0.64 \\ * & 0.62 \end{bmatrix} \quad (5.6.13)$$

$$M(1, 1, :, :) = \begin{bmatrix} 1.00 & 0.89 \\ 0.81 & 0.76 \\ 0.82 & * \\ 0.68 & 0.75 \\ * & 0.69 \\ 0.57 & 0.64 \\ * & 0.62 \end{bmatrix} \quad (5.6.14)$$

$$M(1, 1, :, :) = \begin{bmatrix} 1.00 & 0.88 \\ 0.80 & 0.77 \\ 0.82 & 0.79 \\ 0.70 & 0.73 \\ 0.63 & 0.69 \\ 0.57 & 0.64 \\ 0.50 & 0.62 \end{bmatrix} \quad (5.6.15)$$

Die Parameter der Betriebsmodi $I_b = (5, 1)$ und $I_b = (3, 2)$ entsprechen in A bzw. B nicht den Werten, die anhand der Betrachtung der übrigen Parameter erwartet werden. Ursächlich dafür können Störgrößen in den Anlerndaten oder eine fehlerhafte Identifikation sein. Um dies zu korrigieren, werden die Parameter dieser zwei Betriebsmodi gelöscht (5.6.14), um sie im nächsten Schritt anhand der in den übrigen Modi enthaltenen Dynamik korrekt zu bestimmen. Für für alle Betriebsmodi – inklusiv der fehlenden – gilt $C = 1$ und $D = [0 \ 0]$. Das Ergebnis der Tensorzerlegung bzw. die Näherung der unbekannten Modi wird besser, wenn nur $\begin{pmatrix} A & B \end{pmatrix}$ zerlegt und zurückgerechnet wird und die bekannten, exakten Werte für $\begin{pmatrix} C & D \end{pmatrix}$ eingesetzt werden. Für die Bestimmung der fehlenden oder gelöschten Einträge wird eine Tensordekomposition mit dem Rang 2 gewählt. Zurückgerechnet ergeben sich die Elemente des vervollständigten Parametertensors. Der Parametertensor, der in (5.6.15) ausschnittsweise gezeigt wird, wird mit sechs Monaten Betriebsdaten validiert, siehe Abbildung 5.6-7. Sie zeigt die gemessene Vorlauftemperatur und die resultierenden Residuen $r(k)$ für jeden Betriebsabschnitt. Im Fehlerfall, d.h. $e(k) = 1$, wird $r(k)$ in rot markiert, für Abschnitte fehlerfreien Betriebs ist es grün. Die sechs Fehler, die in den Trainingsdaten erkannt werden, beziehen sich auf Betriebsabschnitte, in denen die Klappe von Kessel 3 geöffnet oder geschlossen wird. Es wird daher angenommen, dass der Volumenstrom $\dot{V}_2$, berechnet aus $\dot{V}$, hydraulischen Parametern und den Klappenpositionen, in diesen Abschnitten aufgrund von Ungenauigkeiten in der Datenerfassung fehlerhaft ist. Abbildung 5.6-8 zeigt einen Sommermonat. Nach einem kompletten Systemausfall am 18. Juni fällt die Vorlauftemperatur unter 35°C . Hierbei wird korrekterweise kein Fehler erkannt, da die Eingangsdaten konsistent zu den Ausgangsdaten sind. In diesem Zeitraum werden keine Brenner angestellt, der Grund für den Ausfall liegt außerhalb der Systemgrenzen dieses Modells. In der Folge wurde am 20. Juni der Brenner 2

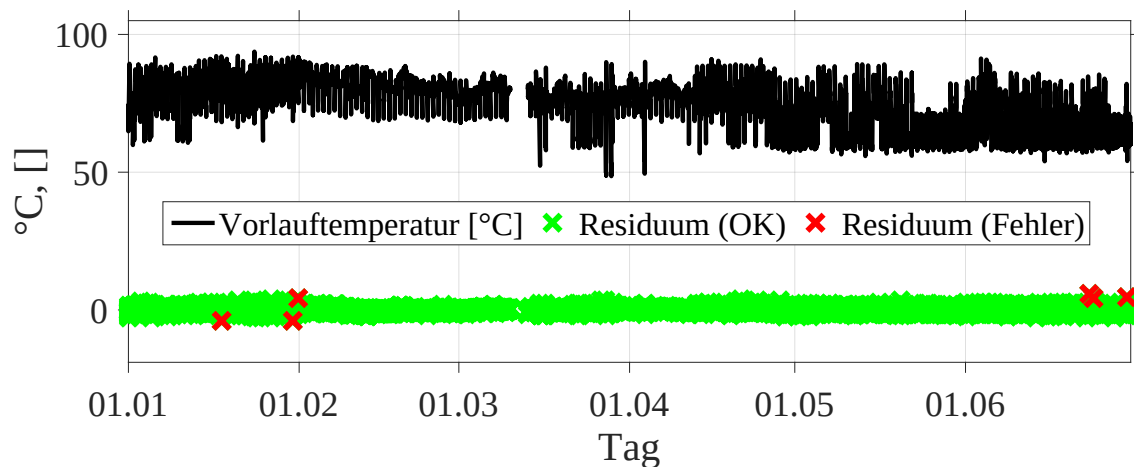


Abbildung 5.6-7: Fehlererkennung Kessel 2, Validierung des Modells

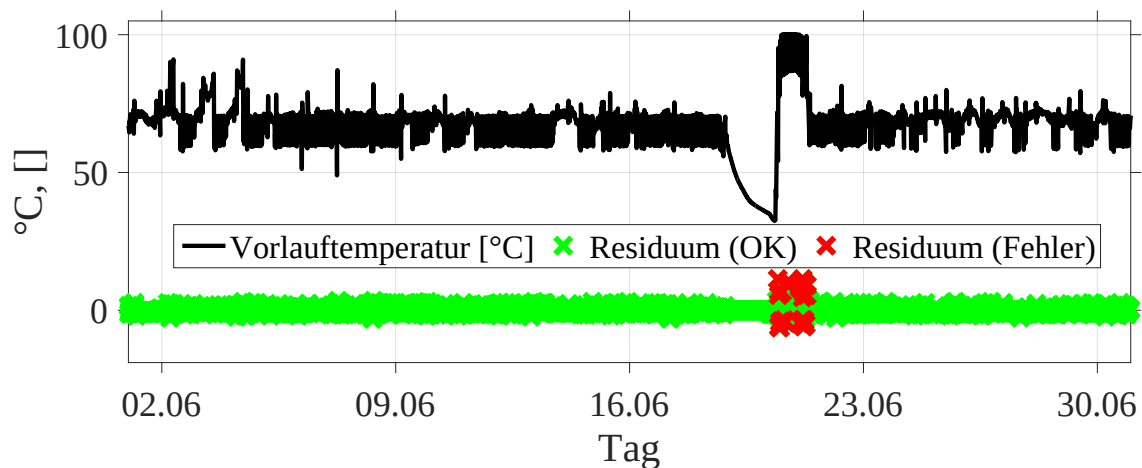


Abbildung 5.6-8: Fehlererkennung Kessel 2, Handeingriff

von dem Haustechnikpersonal in den manuellen Betrieb gesetzt. Er arbeitet daraufhin mit voller Leistung und ohne Einfluss der übergeordneten Regelung. Somit wird das System soweit erhitzt bzw. überhitzt, bis der Kesseltemperaturwächter den Brenner als eine Notmaßnahme abschaltet. Fällt die Temperatur weit genug ab, wird der Brenner wieder freigegeben. Das Verhalten entspricht einem Zweipunktregler an der oberen erlaubten Temperaturgrenze. Das Systemverhalten entspricht nicht mehr dem in M gespeicherten Nominalmodell. Der Fehler wird korrekt erkannt. Am 21. Juni wurde der Fehler behoben, indem die Anlage in den Automatikmodus zurückgesetzt wurde.

Ein weiterer Fehler kann in einem Wintermonat beobachtet werden, siehe Abbildung 5.6-9. Bis zum 14. Dezember setzt der Brenner 2 das Leistungssignal nicht um, und produziert somit nicht die erwartete Wärmeleistung. Das Betriebssignal (an/aus) wird korrekt umgesetzt. Somit ist der Brenner zu den richtigen Zeitpunkten in Betrieb, läuft dann aber auf konstanter Leistung. In der Folge übersteigt die Vorlauftemperatur T_{VL2} die Solltemperatur und die Regelung kann das System nicht stabil ausregeln, es kommt zu Schwingungen. Am 14. Dezember hat ein Servicetechniker den Brenner 2 neu eingestellt und für die restliche Zeit funktioniert der Brenner wie erwartet. Für die Zeit mit fehlerhaftem Betrieb überschreitet das Residuum $r(k)$ die Fehlergrenzen b_o und b_u ,

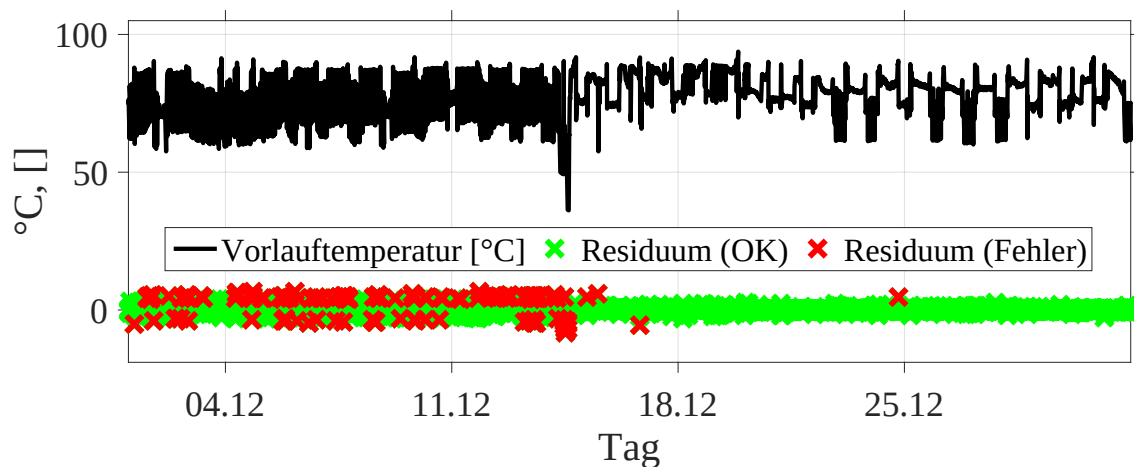


Abbildung 5.6-9: Fehlererkennung Kessel 2, Fehler in der Leistungssteuerung

somit wird der Fehler korrekt erkannt. Die zwei Fehler, die nach dem 15. Dezember markiert werden, sind erneut in Betriebsabschnitten, in denen die Klappe für Kessel 3 geöffnet oder geschlossen wird. Analog zu der Auswertung von Abbildung 5.6-7, kann ein fehlerhafter Volumenstrom $\dot{V}_2$ angenommen werden.

Fazit

Die Betriebsfehler dieser Mehrkesselanlage sind Beispiele für mangelhaften Betrieb, die sich negativ bei Verschleiß und Verbrauch auswirken, aber ohne kontinuierliche Betriebsanalyse nicht erkannt werden. Die Haustechnik wird auf die gezeigten Fehler nicht aufmerksam, da die Heizungsanlage ausreichend mit Wärme versorgt wird. Die komplette Dynamik der Anlage muss in den Anlerndaten vorhanden sein, sonst können die fehlenden Betriebsmodi nicht korrekt bestimmt werden. Die Parameterbestimmung und somit auch die Qualität des zerlegten Tensors ist sensibel auf Fehler und Störgrößen in den Anlerndaten. Die wichtigsten Einflussfaktoren müssen bekannt sein und in die Tensorstruktur einfließen. Bei zu starker Beeinflussung der Faktoren durch äußere Einflüsse oder bei falscher Wahl des Ranges werden für die unbekannten Modi keine sinnvollen Werte errechnet. Eine Bereinigung der Anlerndaten um die bekannten Fehler und Betriebsabweichungen sowie eine Prüfung der Parameter der bestimmbar Modi resultiert in einer verbesserten multi-linearen Struktur. Weiterer Forschungsbedarf besteht im Hinblick auf eine robuste Parameteridentifikation von Zustandsraummodellen, besonders von denen höherer Ordnung. Um die Vervollständigung des Parameterensors mittels Tensordekomposition zu nutzen, müssen die Zustände zwischen den verschiedenen Betriebsmodi vergleichbar sein. Für die Tensorzerlegung besteht weiter Forschungsbedarf, um automatisiert den korrekten Rang zu bestimmen. Es sollte systematisch untersucht werden, ob die in der Struktur des Parameterensors enthaltene Information für eine verbesserte Näherung genutzt werden kann. Weiterhin wurde in dieser Arbeit nicht systematisch untersucht, wie die Wahl der Startwerte der Faktormatrizen das Optimierungsergebnis beeinflussen. Tabelle 5.6-1 zeigt Fehler, die an Komponenten der Wärmeerzeugung bei ausreichender Datengrundlage mit multi-linearen Modellen erkannt werden können.

Tabelle 5.6-1: Fehlerliste für die Erkennung mit multi-linearen Modellen

	Bezeichnung	Beschreibung / Beispiel
H1	Abgleich der Wassermenge durch Wärmeerzeuger	Volumenströme nicht entsprechend der Leistung angepasst, es gibt Probleme bei der Abgabe der Wärme oder beim Einhalten der Vorlauftemperatur
K4	Ausfall Blockheizkraftwerk (BHKW)	Motorprobleme, Verschleiß
K5	Ausfall Kessel	Rost, Spannungsrisse, Verschleiß
K7	Ausfall Klappen oder Ventile (siehe auch Fehler L5, L6)	Verschleiß, häufige Ursache: fehlende Anti-Blockierschaltung
L1	Konfiguration Brenner	Durch falsche Einstellung wird das Reglersignal nicht mehr umgesetzt, es erfolgt keine korrekte Leistungsregelung
L2	Kesseltemperaturwächter	Durch eine zu niedrig eingestellte maximale Kesseltemperatur wird der Kessel zu früh abgeschaltet und es kommt zu keinem stabilen Betrieb
L5	Manuell betätigte Absperrventile oder Bypässe (siehe auch Fehler K7)	Absperrventile / Bypässe werden bei Wartungsarbeiten geschlossen / geöffnet und nach Abschluss der Arbeiten nicht wieder in den Ursprungszustand versetzt

5.6.2 Fehlererkennung mit Verbrauchermodellen

Dieses Unterkapitel zeigt einen Gray-Box Ansatz mit thermische Gleichungen am Beispiel der Einzelraumregelung. Bei Räumen, in denen über Stellmotoren die Durchflussmenge im Heizkörper geregelt wird, kommt es teilweise zu Problemen und Ausfällen. In einigen Anwendungsbereichen - besonders in Schulen - gibt es absichtlich oder unbewusst beschädigte Komponenten. Des weiteren werden Heizkörper mit Einrichtungsgegenständen zugestellt und können ihre Wärme nicht mehr wie geplant abgeben. Abbildung 5.6-10 zeigt diese Probleme. Eine Rückmeldung seitens des Nutzers erfolgt selten, es kommt zu Mehrverbrauch an Heizenergie und ggf. zu Komfortproblemen. Im Falle der Einzelraumregelung werden mit der Messung der Raum- und Außentemperatur sowie der Ventilstellung genügend Daten aufgezeichnet, um eine Fehlererkennung durchzuführen. Zur Überprüfung von Räumen mit Einzelraumregelung wird ein Modell benötigt, welches aus den Eingangsgrößen Ventilstellung, Vorlauf- und Außentemperatur eine Raumtemperatur errechnen kann. Für diese Aufgabe ist ein 3-Zonen-Modell geeignet, welches auf dem in Kapitel 5.3.2.1 eingeführten Modell basiert. Es wird erweitert, um die oben gezeigten Fehler im Bereich des Ventils erkennen zu können. Der Volumenstrom im Heizkörper setzt sich aus zwei Komponenten zusammen, Gleichung (5.6.16). Die Ventilstellung beeinflusst den Summand $\dot{V}_{Ventil}$. Der Summand $\dot{V}_{konst}$ ist konstant, z. B. durch defekten oder demontierten Antrieb verursacht. Auch konstant wirkende Fremdwärme kann in ihm enthalten sein.

$$\dot{V}_{HK} = \dot{V}_{Ventil} + \dot{V}_{konst} \quad (5.6.16)$$

Die Leittechnik erfasst die Soll-Ventilstellung als Prozentwert, der Volumenstrom je Heizkörper oder Raum wird nicht gemessen. Der Volumenstrom durch den Heizkörper

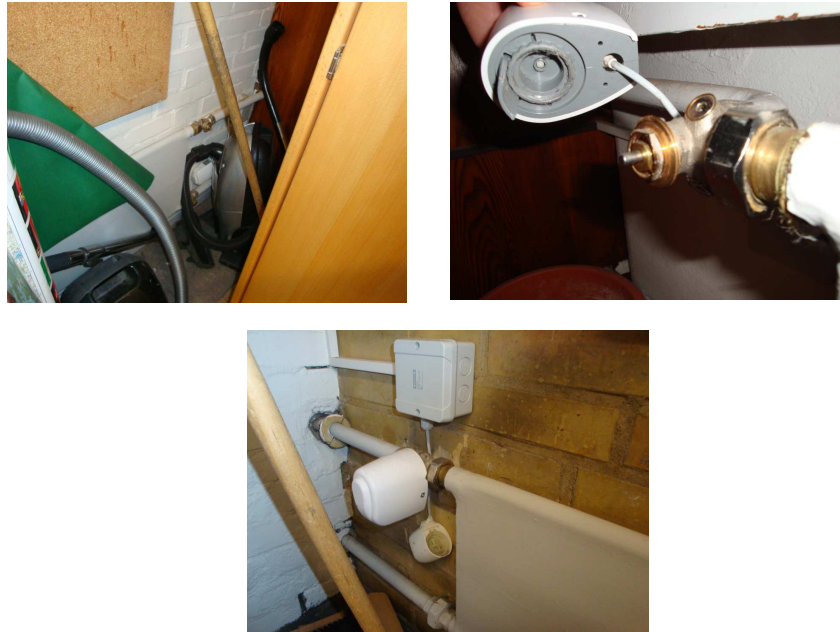


Abbildung 5.6-10: Beispiele für defekte Heizkörperstellantriebe

wird näherungsweise aus der Ventilstellung und dem maximalen Volumenstrom unter Berücksichtigung der Nichtlinearität der Regelventile errechnet:

$$\dot{V}_{Ventil} = \frac{\ln(Ventilstellung) \cdot fac_{ventil}}{100} \cdot \dot{V}_{Ventil,max}. \quad (5.6.17)$$

Die Abhängigkeit von Volumenstrom und Ventilstellung ist in 5.6-11 dargestellt. Die Parametrierung der Umrechnung wurde anhand der Messdaten angepasst, um das reale Anlagenverhalten möglichst gut abzubilden. Allgemeine lineare und gleichprozentige

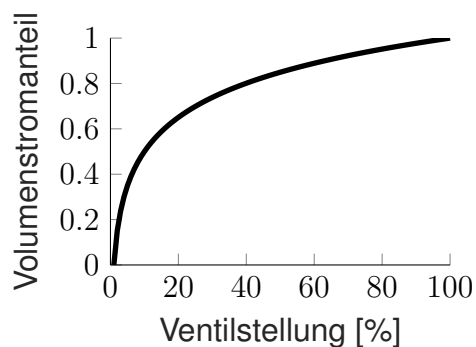


Abbildung 5.6-11: Durchflusskennlinie

Kennlinien von Regelventilen werden im Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik [48] angegeben. Mit den Gleichungen (5.3.16) bis (5.3.19) sowie Gleichungen (5.6.16) und (5.6.17) kann ein SIMULINK -Modell mit folgenden Parametern erstellt werden:

- Eingangsgrößen:
Vorlauftemperatur T_{VL} , Außentemperatur T_A , Ventilstellung.
- Variable Parameter, die über Optimierung geschätzt werden:
konstanter Volumenstrom $\dot{V}_{konst}$, maximaler (variabler) Volumenstrom, Übergangskoeffizienten Heizung-Raum $k_{HK,R}$ und Raum-Gebäude $k_{R,G}$, Wärmekapazität des Raumes C_R , Startwert der Raumtemperatur.
- Während der Optimierung nicht veränderliche Parameter:
spezifische Wärmekapazität c_W , Dichte ρ_W , Heizkörpervolumen V_{HK} , Rücklauf-temperatur T_{RL} , Übergangskoeffizient Gebäude - Aussen $k_{G,A}$, Übergangskoeffizient Raum - Aussen $k_{R,A}$, Wärmekapazität des Gebäudes C_G , Ventilfaktor.
- Für die Heizkörper- und Gebäudetemperatur T_{HK} bzw. T_G werden Startwerte definiert.

Es werden nur Zeiträume betrachtet, in denen das Verhältnis von Wärmeverlusten über die Gebäudeaußenwand groß ist im Vergleich zu den inneren Wärmequellen. Anderenfalls ist der Wärmebedarf zu gering und die Parameter können nicht mehr zuverlässig geschätzt werden. Im mäßig gedämmten Gebäuden wurde eine Grenze von 7 °C mittlerer Tagestemperatur als sinnvoll ermittelt.

Ansatz 1: Verlauf Raumtemperatur im Vergleich zur Simulation

Für die Fehlererkennung wird die simulierte Raumtemperatur mit der gemessenen verglichen. Bei größeren Abweichungen im Verlauf besteht der Verdacht auf defekte Ventile, dauerhaft geöffnete Fenster oder Versorgungsprobleme auf Heizungsseite. In den Abbildungen 5.6-12 und 5.6-13 ist beispielhaft ein ausgewähltes Simulationsergebnis für zwei Räume dargestellt. beispielhaft ein ausgewählte Simulationsergebnisse für zwei Räume dargestellt. Die Simulation wurde mit dem Ergebnis der jeweiligen Para-

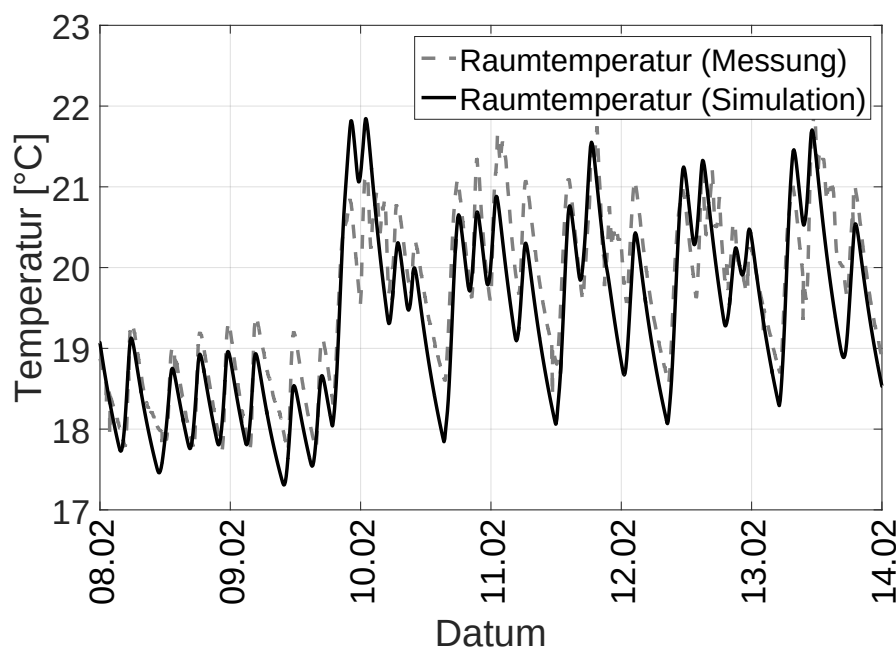


Abbildung 5.6-12: Simulationsergebnis: Raumtemperaturen

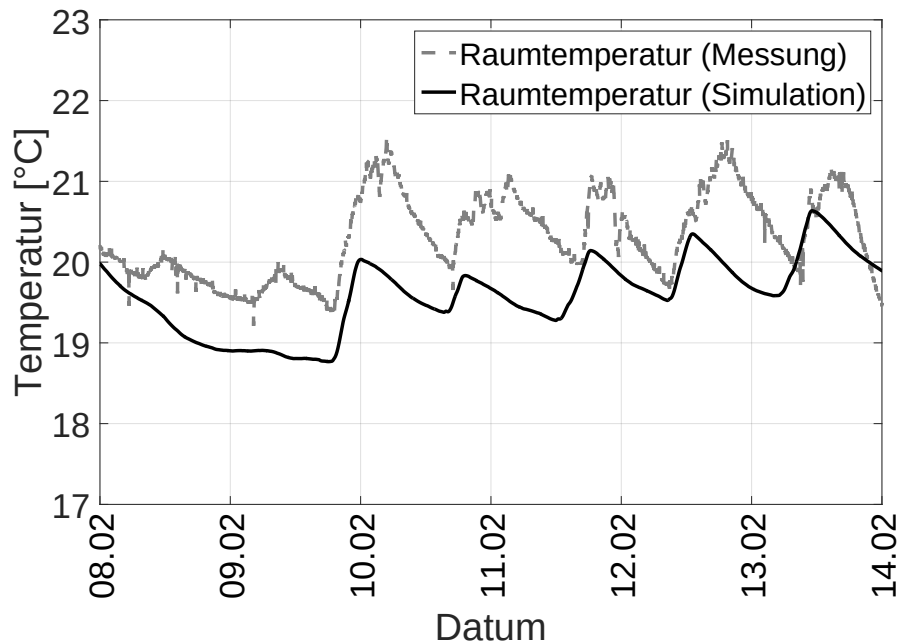


Abbildung 5.6-13: Simulationsergebnis Fehlerfall: Raumtemperaturen

meterschätzung durchgeführt. Auf der linken Seite ist ein Raum gewählt, dessen Einzelraumregelung funktioniert. Es ist eine Nacht- und Wochenendabsenkung erkennbar, an Werktagen wird die Raumtemperatur auf 20,5 °C geregelt. Das Simulationsergebnis passt sich gut den Messdaten an. Auf der rechten Seite ist der Temperaturverlauf für einen Raum dargestellt, in dem ein Motorventil demontiert ist. Dadurch wird der Raum durchgehend mit Wärme versorgt, ein Absenkbetrieb auf Werte zwischen 18 °C und 19 °C ist nicht möglich. Der Verlauf von Simulation und Messung ist ähnlich, aber nicht so gut angenähert wie der des fehlerfreien Raumes. Der Ansatz kann erweitert werden von der Fehlererkennung auf die Fehlerisolation, indem der Raum mit mehreren Parametersätze geprüft wird. So können auch Parametersätze verwendet werden, die fehlerbehaftete Betriebsweisen wie geöffnete Fenster oder defekte Ventile enthalten. Der Parametersatz, der den Raumtemperaturverlauf am besten annähert, wird gewählt und somit ist auch die Art des Fehlers bekannt.

Ansatz 2: Parameterschätzung

Ein weiterer Ansatz zur Fehlererkennung ist die Nutzung der Parameterschätzung, deren Ablauf in Abbildung 5.3-8 dargestellt ist. Die Koeffizienten $\dot{V}_{konst}$, $\dot{V}_{Ventil,max}$, $k_{HK,R}$, C_R , $k_{R,G}$ werden dabei verwendet. Über- bzw. unterschreiten die Parameter durch Schwellwerte festgesetzte Fehlergrenzen, so wird ein fehlerhafter Betrieb angenommen. Je nach Optimierungsalgorithmus und Konfiguration der Parameterbereiche können die Volumenströme negative Werte annehmen, was ebenfalls auf einen Fehler hinweist.

Ansatz 3: Betrachtung der Wärmeleistung

Auch der aus der Simulation errechnete Volumenstrom bzw. die Wärmeleistung kann zur Fehlererkennung genutzt werden. Die eingebrachte Wärme, Gleichung (5.6.18), setzt sich aus einem konstanten und einem über die Ventilstellung variablen Anteil

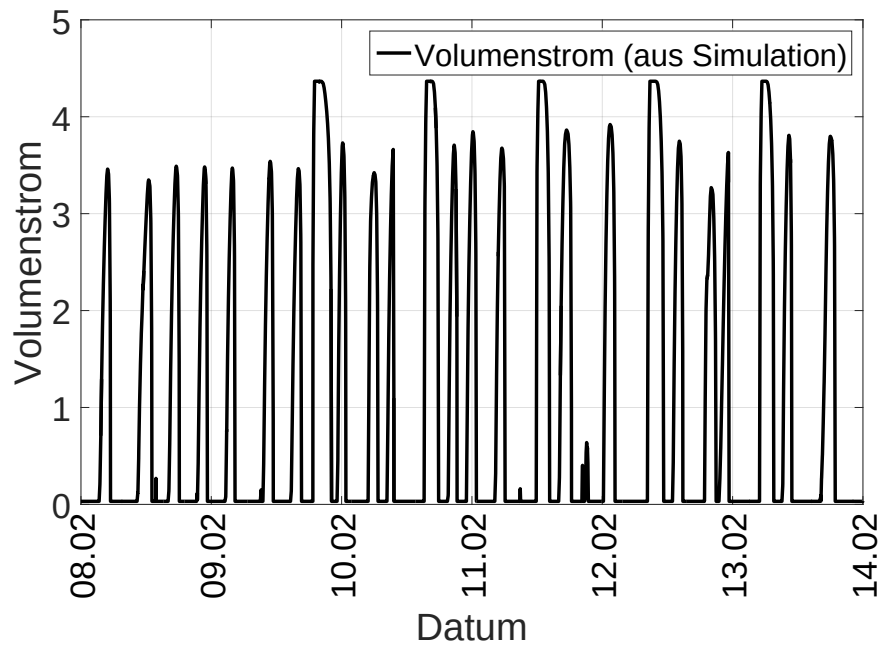


Abbildung 5.6-14: Simulationsergebnis: Volumenstrom

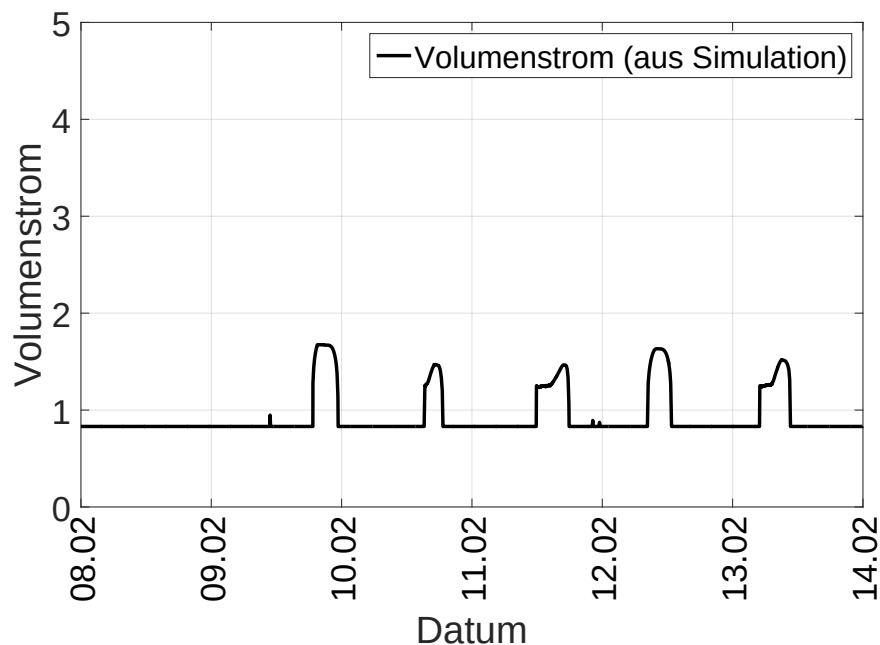


Abbildung 5.6-15: Simulationsergebnis Fehlerfall: Volumenstrom

zusammen, analog zu den Volumenstromanteilen aus Gleichung (5.6.16).

$$\dot{Q}_{\text{Heizung}} = c_W \rho_W \dot{V}_{HK} \cdot (T_{VL} - T_{RL}) \quad (5.6.18)$$

Die Abbildungen 5.6-14 und 5.6-15 zeigen die simulierten Volumenströme für die beiden Beispierräume. Ein hoher konstanter Anteil (rechts) lässt die Fehlerwahrscheinlichkeit steigen, da dies auf dauerhaft geöffnete Ventile schließen lässt.

Nutzung der Redundanz

Weichen bei mehreren vergleichbaren Räumen bei mindestens einem Raum die Faktoren deutlich von denen der anderen ab, ist ein fehlerhafter Betrieb wahrscheinlich. Die Auswirkungen von äußeren Einflüssen wie Sonneneinstrahlung können über den Vergleich mehrerer Räume mit gleicher Ausrichtung berücksichtigt werden. Somit ist eine Korrektur möglich und eine Steigerung der Zuverlässigkeit des Ergebnisses der oberen drei Ansätze kann erreicht werden.

Anwendungsbeispiel

Das Vorgehen wird an einem Schulgebäude demonstriert. Es ist nur mäßig gedämmt und hat insgesamt drei Stockwerke mit jeweils vier Klassenräumen. Diese sind mit

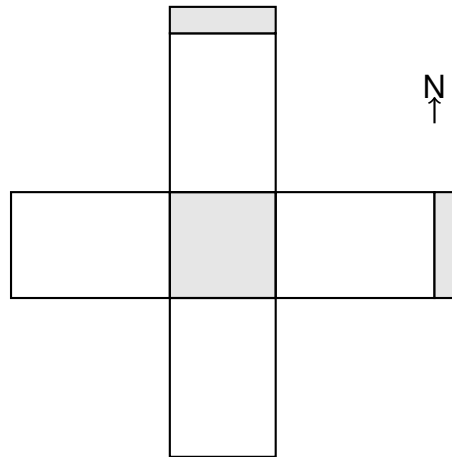


Abbildung 5.6-16: Planskizze Kreuzbau

einer Einzelraumregelung ausgestattet, in jeder Klasse befinden sich zwei Heizkörper mit eigenen Stellantrieben. Eine grobe Skizze ist in 5.6-16 dargestellt. Toiletten und Treppenhäuser sind grau markiert und werden ebenso wie Vor- und Gruppenräume im weiteren Verlauf nicht weiter betrachtet. Die Ausrichtung nach Himmelsrichtung ist in der Grafik angegeben, die Fensterausrichtung ist dabei nach Süden bzw. Westen. Die Messdatenerfassung ist ausreichend, die Daten werden im Minutenraster gespeichert. Im Dezember 2013 und im Mai 2014 wurde bei Vor-Ort-Terminen der Zustand der Klassenräume hinsichtlich der Beheizung aufgenommen. Aus Tabelle 5.6-2 ist ersichtlich, dass Ende 2013 drei Motorventile nicht funktionierten.

Tabelle 5.6-2: Bestandsaufnahme Klassenräume Kreuzbau

Raum	Befund 12/2013	Problem 2013 behoben	Befund 5/2014
Nord EG	Heizkörper 60% zugestellt	nein	Heizkörper 60% zugestellt
Nord 1.OG	1 Ventil defekt	nein	1 Ventil defekt
Nord 2.OG			Heizkörper 50% zugestellt
Ost EG	Heizkörper 60% zugestellt	nein	
Ost 1.OG	Heizkörper teilweise zugestellt	nein	
Ost 2.OG	1 Ventil nicht korrekt montiert	ja	Heizkörper 50% zugestellt
Süd EG	Heizkörper 60% zugestellt	nein	Heizkörper 60% zugestellt
Süd 1.OG			
Süd 2.OG	Heizkörper teilweise zugestellt	nein	
West EG	Raum schlecht gedämmt Heizkörper 60% zugestellt	nein	Raum schlecht gedämmt Heizkörper 60% zugestellt
West 1.OG	1 Ventil nicht korrekt montiert Heizkörper 60% zugestellt	ja nein	Heizkörper 60% zugestellt
West 2.OG	1 Fenster schließt nicht richtig	ja	

Zwei konnten wieder montiert werden, eines hatte einen Defekt am Gewinde. Zum Mai 2014 hat sich an dem Zustand der Motoren nichts verändert, auch sind weiterhin viele Heizkörper zugestellt.

Der Ablauf der Parameterschätzung ist in Kapitel 5.3.1.3 beschrieben. Die ersten Startwerte für das 3-Zonen-Modell aus Abbildung 5.3-14 wurden von einem 2-Zonen-Modell [42] übernommen und manuell angepasst. Die Parameterschätzung und -optimierung erfolgen mit der *SIMULINK Design Optimization Toolbox*. Die Gütefunktion umfasst dabei sowohl die Raumtemperatur als auch deren Ableitung. So wird sichergestellt, dass der absolute Wert und der Verlauf in die Bewertung einfließen. Bei Anpassung der Parameter an ein anderes Gebäude ist es zunächst empfehlenswert, den Wert für die mittlere Heizkörpertemperatur in die Gütefunktion aufzunehmen, da so schneller ein geeigneter Parametersatz gefunden werden kann. Die Verbesserung der Abschätzung erfolgt danach ohne die mittlere Heizkörpertemperatur. Die Startparameter der Simulation sind die in Tabelle 5.6-3 genannten Werte.

Tabelle 5.6-3: Grundparameter für das 3-Zonen-Modell

Parameter	Beschreibung	Wert	Einheit	Eigenschaft
c_W	spezifische Wärmekapazität von Wasser	4182,6	kJ/(kgK)	konstant
ρ_W	Dichte	1000	kg/m ³	konstant
$\dot{V}_{Ventil,max}$	maximaler variabler Volumenstrom	$7 \cdot 10^{-3}$	m ³ /s	variabel
$\dot{V}_{konst}$	konstanter Volumenstrom	0	m ³ /s	variabel
$f a_{C_{ventil}}$	Ventilfaktor	21,715		konstant
V_{HK}	Heizkörpervolumen	35	m ³	konstant
$T_{HK,Start}$	Starttemperatur Heizkörper	aus Messdaten	°C	variabel
$k_{HK,R}$	Übergangskoeffizient Heizkörper - Raum	700	W/K	variabel
C_R	Wärmekapazität des Raumes	$3 \cdot 10^7$	Ws/K	variabel
$T_{R,Start}$	Startwert der Raumtemperatur	aus Messdaten	°C	variabel
$k_{R,G}$	Übergangskoeffizient Raum - Gebäude	$5 \cdot 10^4$	W/K	variabel
$k_{R,A}$	Übergangskoeffizient Raum - Außen	0	W/K	konstant
C_G	Wärmekapazität des Gebäudes	$1 \cdot 10^{10}$	Ws/K	konstant
$T_{G,Start}$	Startwert der Gebäudetemperatur	288	°C	variabel
$k_{G,A}$	Übergangskoeffizient Gebäude - Außen	$1,3 \cdot 10^4$	W/K	konstant

Es ist zu beachten, dass über die Abhängigkeiten der Volumenströme, Koeffizienten und Massen mehrere Parametersätze für die gleichen Modelleigenschaften gefunden werden können. Von eventuellen numerischen Problemen bei der Wahl von sehr großen oder kleinen Werten abgesehen sind die Absolutwerte für die Betrachtung nicht relevant, sie werden in der Auswertung nicht verwendet. Somit bleibt es bei der Orientierung der Werte an den von Pangalos et al. [42] für ein Gebäude bestimmten Werten. Sie sind die betrachteten Klassenräume zu groß, aber für das Vorgehen angemessen. Für die meisten Parameter ist ein Bereich von Null bis zum doppelten ihres Startwerts als Optimierungsraum vorgegeben. Der gewählte Optimierungsalgorithmus *Isqnonlin* arbeitet nach dem Prinzip der kleinsten Fehlerquadrate. Die simulierten Raumtemperaturen stimmen nach der Parameterbestimmung ausreichend mit den gemessenen überein - mit Ausnahme von fehlerhaften Räumen. Für den Monat November 2013 ist in Grafik 5.6-17 der Vergleich von Messung und Simulation aufgetragen.

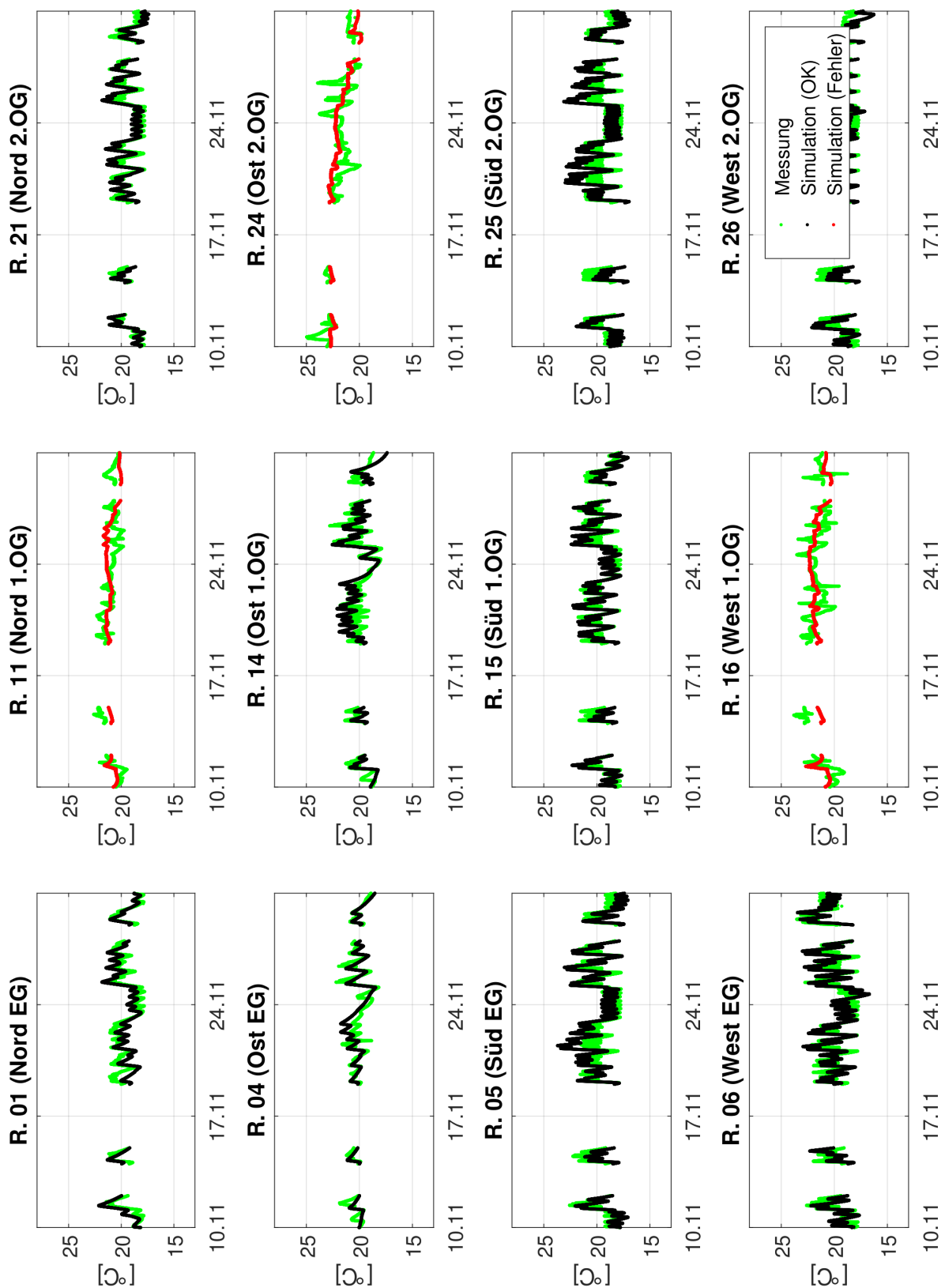


Abbildung 5.6-17: Gemessene und Simulierte Raumtemperatur - November 2013

Ansatz 1: Verlauf Raumtemperatur im Vergleich zur Simulation

Ein Ansatz ist die Prüfung der Raumtemperatur mit dem Vergleich der Simulationsdaten, die für verschiedene Parametersätze errechnet werden. Dafür wurde das Verbrauchermodell um einen Auskühlfaktor für dauergeöffnete Fenster ergänzt und mit folgenden Parametersätzen simuliert:

- Fenster offen: der Faktor für die Auskühlung über die Fenster wurde erhöht.
- Defektes (dauergeöffnetes) Heizkörperventil: der Parameter für den konstanten Volumenstrom $\dot{V}_{konst}$ ist erhöht.
- Heizkörper zugestellt: der Übergangskoeffizient vom Heizkörper zum Raum wurde niedriger gewählt.

Die Ergebnisse sind in den Abbildungen 5.6-18 für den fehlerfreien Raum R.15 und in Abbildung 5.6-19 für den Raum R. 11, in dem ein Ventil defekt ist, dargestellt. Für Raum 15 stimmt das Simulationsergebnis des fehlerfreien Parametersatzes am besten mit dem Messergebnis überein. Im Falle von Raum 11 entspricht die Simulation, in der der konstante Volumenstromanteil $\dot{V}_{konst}$ manipuliert wurde, am ehesten mit der Messung überein. Dieser Ansatz ermöglicht es auch, eine Fehleridentifikation durchzuführen, da bei der Erstellung der manipulierten Parametersätze bekannt ist, welcher Fehler abgebildet werden soll. Allerdings konnte das gute, oben dargestellte Ergebnis nicht bei allen Räumen nachvollzogen werden. So sind für den Raum West 2.OG die Auswirkungen des defekten Fensters, siehe Tabelle 5.6-2, nicht ausreichend groß, um den Fehler mit diesem Ansatz zu erkennen. Teilweise behindern äußere Einflüsse und bauliche Gegebenheiten, die nicht in dem Modell abgebildet werden, die Fehlererkennung.

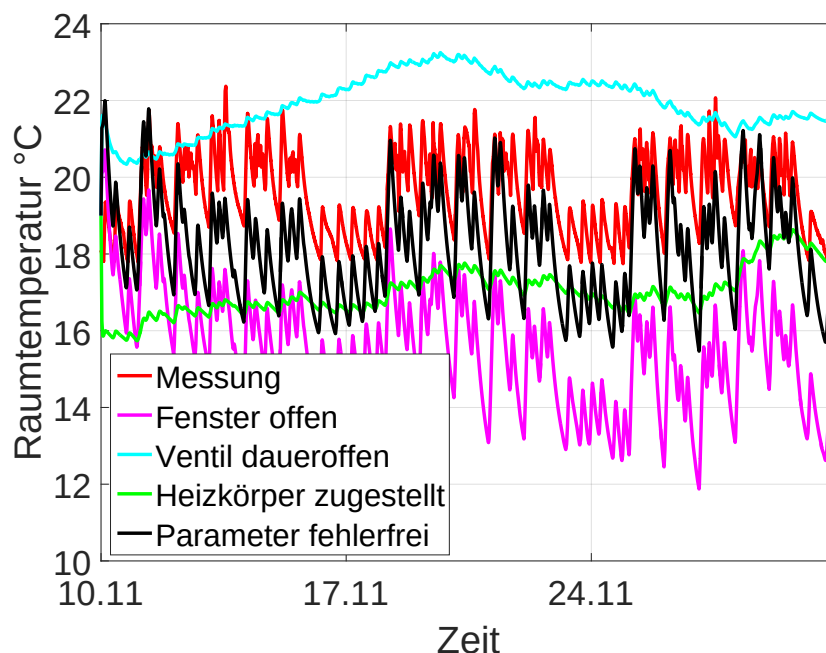


Abbildung 5.6-18: R. 15: Simulation Raumtemperatur, ohne Fehler

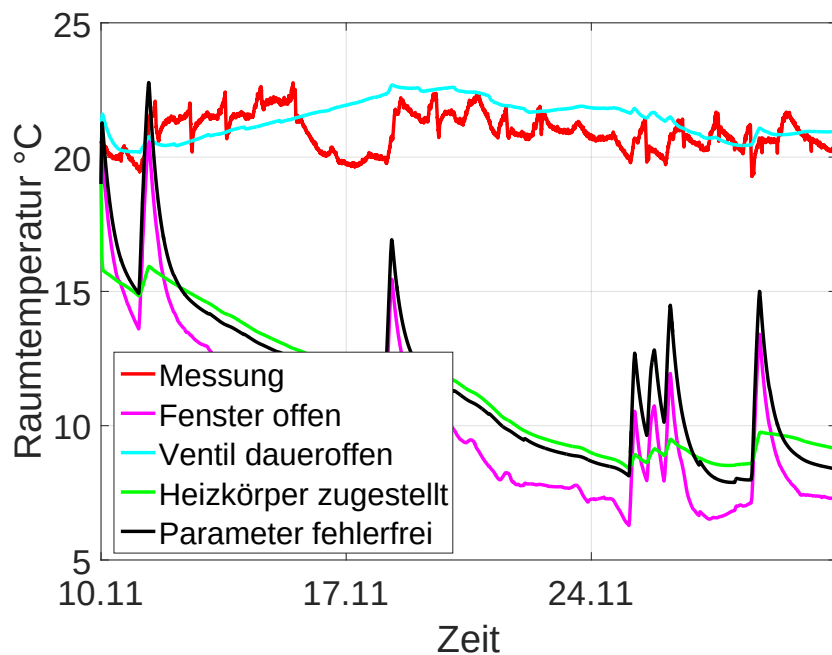


Abbildung 5.6-19: R. 11: Simulation Raumtemperatur, mit Fehler

Ansatz 2: Parameterschätzung

In Tabelle 5.6-4 wird ein Auszug aus der Parameterschätzung für den maximalen variablen Volumenstrom gezeigt. Die Werte für die Räume 1. OG Nord, 2. OG Ost und

Tabelle 5.6-4: Parameter für maximalen variablen Volumenstrom

	EG	1. OG	2. OG
Nord	0.0037	6.8557e-04	0.0015
Ost	0.0040	0.0033	7.8272e-04
Süd	0.0028	0.0034	0.0022
West	0.0044	8.4751e-04	0.0028

1. OG West weichen deutlich von denen der anderen Räume ab und weisen entsprechend auf einen Fehler in diesen Räumen hin. Der Fehlerschwellwert kann in Abhängigkeit der bekannt fehlerfreien Räume definiert werden. Ein trainierter Nutzer kann schnell anhand der Parameter zu prüfende Räume ermitteln. Die Definition allgemeingültiger Fehlerschwellwerte, beispielsweise anhand der Erkennung von von Außereisern im Parametersatz, muss weiter untersucht werden.

Ansatz 3: Betrachtung der Wärmeleistung

Aufbauend auf der Parameterschätzung wird die Wärmeleistung für die Fehlererkennung verwendet. Die Wärmeleistung wird in Abbildung 5.6-20 dargestellt. Das Wärmeleistungssignal wird für die Fehlererkennung in einen konstanten und einen variablen Anteil aufgeteilt. Für den konstanten Anteil erfolgt eine Korrektur nach der Himmelsrichtung: Es wird der jeweils niedrigste konstante Anteil von allen Räumen einer Ausrichtung abgezogen. So kann der Einfluss der Sonneneinstrahlung über die Fensterflächen vereinfacht berücksichtigt werden. Die Fehlerwahrscheinlichkeit je Raum wird ermittelt aus dem Quotient der verbleibenden konstanten mittleren Wärmeleistung zu der variablen mittleren Wärmeleistung. Bei fehlerhaften Räumen wird Indikator so verstärkt. In Grafik 5.6-17 ist das Ergebnis der Fehlererkennung mit eingezeichnet, die entsprechenden Räume sind rot markiert. Die Räume mit defekten oder demontierten Motorventilen werden erkannt. Bei Überprüfung des Zeitraums von Januar bis März 2014 kommt es bei gleichen Einstellungen zu Fehlalarmen, es werden tendenziell zu viele Räume als fehlerhaft markiert. Bei Anpassung der Schwellenwerte werden im Januar bis März 2014 die Fehler korrekt erkannt, im November 2013 hingegen nicht mehr alle Fehler. Für die Definition allgemeingültiger Schwellenwerte müssen die Abhängigkeiten der Räume untereinander und die von den äußeren Einflüssen weiter systematisch untersucht werden.

Fazit

Das Modell ist geeignet, um den Raumtemperaturverlauf ausreichend genau abzubilden. Die Fehler müssen größere Auswirkungen auf die Temperatur haben als durch die Ungenauigkeit bei der Modellbildung verursachten Toleranzen. Die Parameterschätzung kann angemessene Parametersätze erzeugen. Durch die Betrachtung des Quotienten von konstanter mittlerer Wärmeleistung zu variabler mittlerer Wärmeleistung können fehlerhafte Räume erkannt werden. Es besteht weiterer Forschungsbedarf zur allgemeingültigen Definition der Fehlerschwellenwerte. Die solare Einstrahlung ist neben dem Nutzereinfluss die stärkste Störgröße. Mit der Erfassung und Betrachtung der Daten eines Solarstrahlungsmessers könnte die Überprüfung und die Definierbarkeit von Fehlergrenzen verbessert werden. Die Fehler in Tabelle 5.6-5 können dieser Methodik zugeordnet werden.

Tabelle 5.6-5: Fehlerliste für Prüfung mit Verbrauchermode

	Bezeichnung	Beschreibung / Beispiel
Z1	Zugestellte Heizkörper	
H9	Abgleich von Heizflächen	Heizflächen sind nicht abgeglichen, es kommt zur Rücklaufanhebung und/oder Unterversorgung von Bereichen
K12	Motorventile oder Thermostate	Defekt, meist mechanisch auf Grund von Fehlbedienung oder Vandalismus

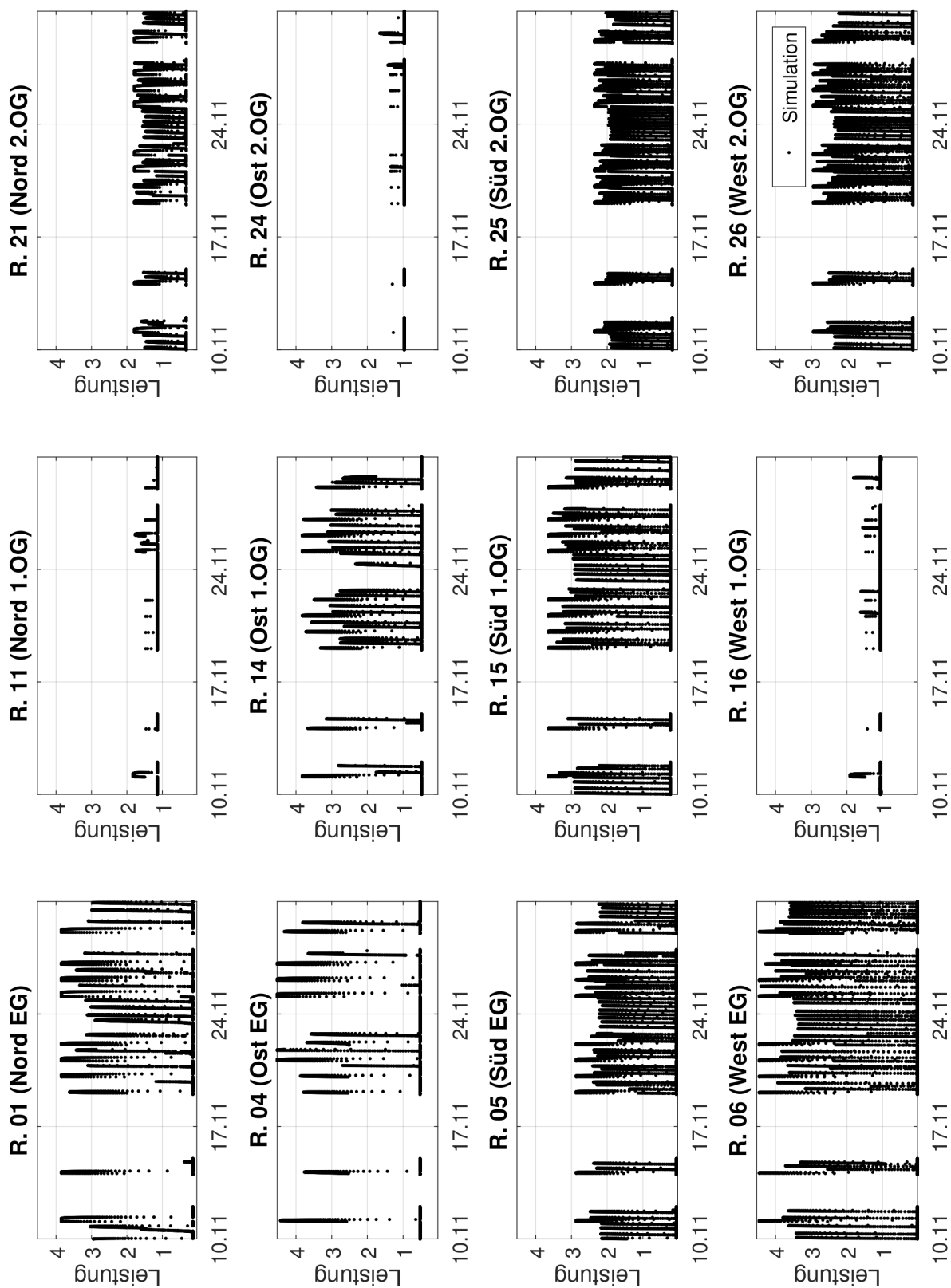


Abbildung 5.6-20: Simulierte Wärmeleistung - November 2013

5.6.3 Überprüfung der Systemzeit

Wenn die Uhrzeit in der Gebäudeleittechnik und / oder in der Direkten Digitalen Regelung (DDC) nicht korrekt eingestellt ist, kommt es zu einer ungewollten Verschiebung der Nutzungszeiten und ggf. zu Komfortproblemen, beispielsweise wenn Lüftungsanlagen nicht zu Zeiten der tatsächlichen Nutzung in Betrieb sind.

Liegen für ein Gebäude Messdaten für die solare Einstrahlung, z.B. durch die Verwendung eines Pyranometers oder eines Stromzählers für eine Photovoltaikanlage vor, so können diese genutzt werden um den Zeitstempel zu prüfen. Aus der Zeitgleichung¹¹ können unter Berücksichtigung der geographischen Lage die Zeitpunkte für Sonnenaufgang bzw. -untergang berechnet werden. Auch aus den Messdaten können Zeitpunkte für Sonnenaufgang bzw. -untergang berechnet werden, indem die Punkte bestimmt werden, in denen die Strahlungs- oder Leistungswerte über einen Schwellwert steigen bzw. sinken. Bei einer zu großen Abweichung von den aus der Zeitgleichung bestimmten zu den aus den Messdaten bestimmten Uhrzeiten muss die Uhrzeit in der GLT und Direkte Digitale Regelung (DDC) geprüft werden. Die Abbildung 5.6-21 zeigt den Vergleich bei Nutzung eines Pyranometers. Die Abweichung in diesem Fall sind sehr gering. Abbildungen 5.6-22 und 5.6-23 zeigen den Vergleich bei Nutzung der Leistungswerte einer Photovoltaikanlage. Die schwarz durchgezogenen Linien markieren den Zeitpunkt, der modellbasiert berechnet wurde und die schwarz gestrichelten Linien den aus den Messdaten bestimmten. In der Abbildung 5.6-22 ist der fehlerbehaftete Fall dargestellt, Abbildung 5.6-23 hingegen zeigt die Daten des Folgejahres, in denen die Uhrzeit korrekt eingestellt ist.

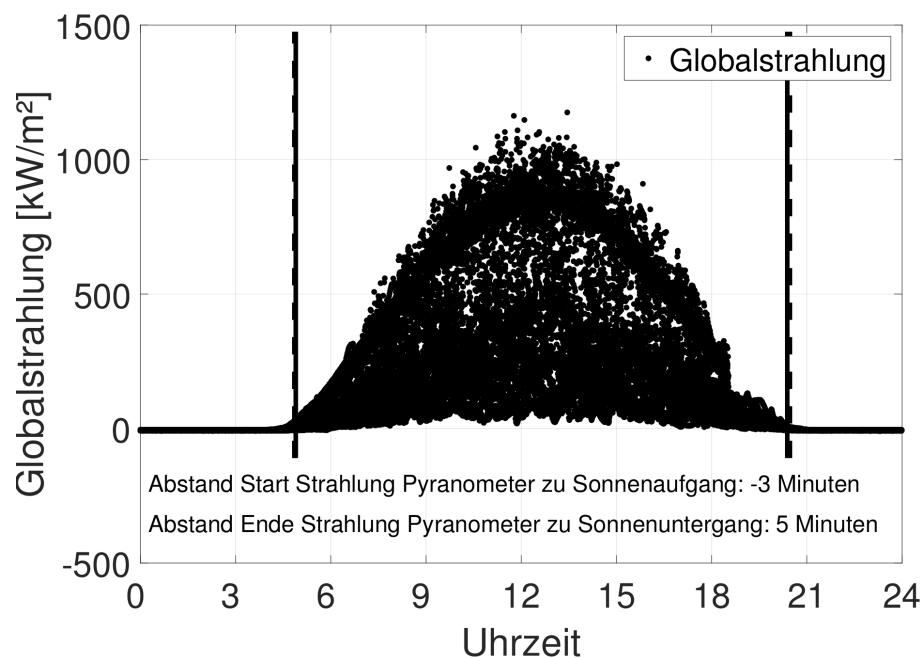


Abbildung 5.6-21: Vergleich berechneter Sonnenaufgang bzw. -untergang zur Globalstrahlung

¹¹siehe z.B <https://de.wikipedia.org/wiki/Zeitgleichung> und <http://lexikon.astronomie.info/zeitgleichung/>

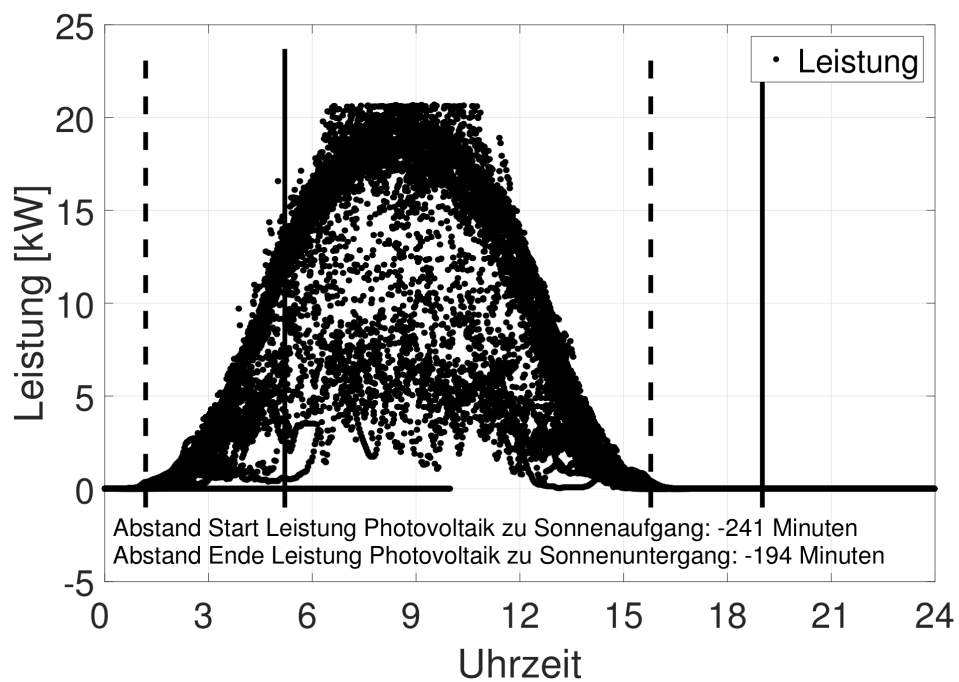


Abbildung 5.6-22: Vergleich Sonnenaufgang bzw. -untergang zu Leistungsprofil, mit Fehler

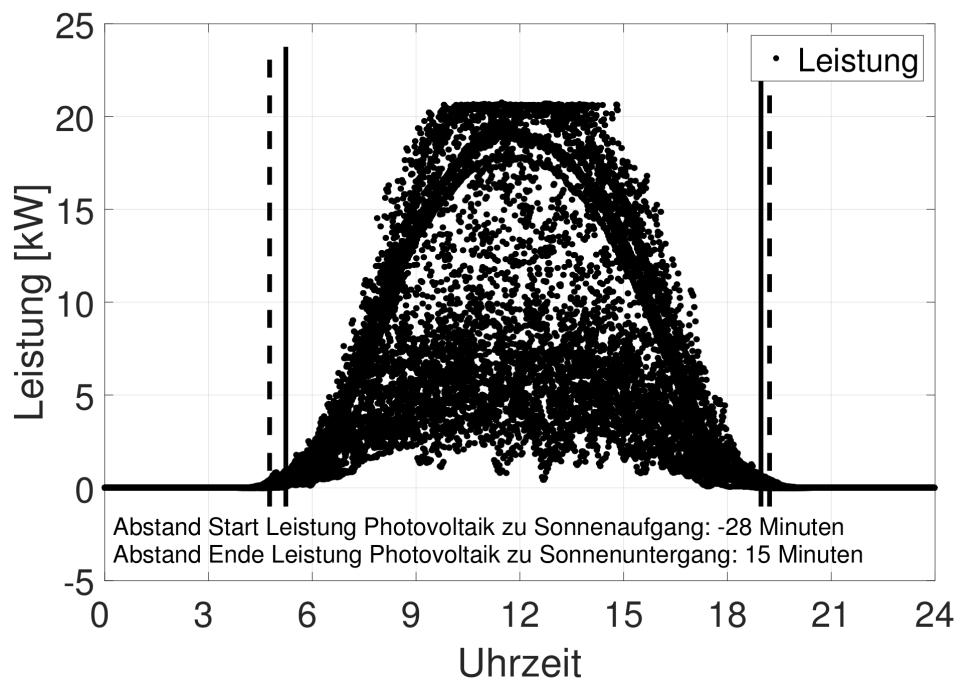


Abbildung 5.6-23: Vergleich Sonnenaufgang bzw. -untergang zu Leistungsprofil, ohne Fehler

Auch der Außentemperaturverlauf kann für eine Kontrolle verwendet werden. Die kältesten Tagestemperaturen gibt es in der Regel um den Sonnenaufgang, je nach Jahreszeit etwas davor bzw. danach, siehe Abbildung 5.6-24. Auch hier markiert die schwarz durchgezogene Linie den Zeitpunkt, der modellbasiert berechnet wurde und die schwarz gestrichelte Linie den aus den Messdaten bestimmten. Allerdings ist diese Methode deutlich ungenauer als die oben vorgestellte Nutzung der Solardaten. Dies liegt an der witterungsbedingten Streuung der tiefsten Temperatur und an der Messgenauigkeit, die eine Ermittlung des exakten Tiefpunktes nicht zulässt. Die Außentemperatur ist nicht an einem exakten Zeitpunkt auf dem niedrigsten Stand sondern über einen Zeitraum auf gleichen Temperaturwerten. Grobe Abweichungen von mehreren Stunden, die starke Auswirkungen auf die Komfortparameter haben, können so erkannt werden. Mit beiden Ansätzen kann der in Tabelle 5.6-6 genannte Fehler erkannt werden.

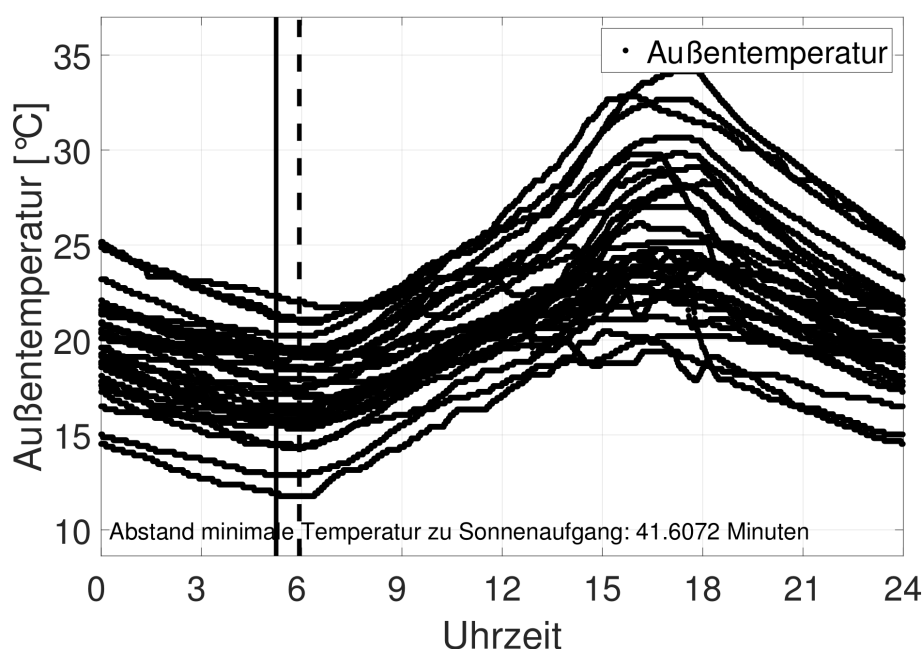


Abbildung 5.6-24: Verlauf der Außentemperatur

Tabelle 5.6-6: Fehlerliste für Prüfung mit Sonnenstandsmodell

	Bezeichnung	Beschreibung / Beispiel	Prüfart
D4	Uhrzeit stimmt nicht	Eingestellte und aufgezeichnete Uhrzeit in der GLT stimmt nicht mit der tatsächlichen überein. Dadurch kommt es zu Abweichungen bei Zeitprogrammen	modellbasiert, Vergleich mit berechneten Sonnenstand

5.7 Mustererkennung in Raumtemperaturdaten - Detektion offener Fenster (IngSoft)

Die Firma IngSoft entwickelte im Rahmen des Projektes Algorithmen zur Erkennung geöffneter Fenster. Leider lag dazu bei Redationsschluss kein abgabereifer Bericht vor.

5.8 Fazit und Ausblick

Das Ziel dieses Arbeitspaketes war es, Methoden zu entwickeln, die bei der Betriebsüberwachung von Heizungsanlagen dem Anwender helfen, einen fehlerhaften Betrieb seiner Anlage zu erkennen. Der Nutzer soll auf fehlerhaften Betrieb aufmerksam gemacht werden, damit er weitere Maßnahmen zur Fehleridentifikation und -behebung auslösen kann.

Neben der Erarbeitung der theoretischen Grundlagen der Fehlererkennung wurde der Betrieb von Heizungsanlagen analysiert. Die identifizierten Fehler wurden in einer Datenbank abgelegt. Bei der Beurteilung und Einordnung der Fehler ist zu bedenken, dass es sich um Bestandsgebäude handelt, die schon länger in Betrieb sind und nicht um Neubauten. Mit Hilfe dieser Datenbank wurde bestimmt, welche Fehler häufig vorkommen und große Auswirkung haben. Aus den aus der Literatur erarbeiteten Methoden der Fehlererkennung wurden anschließend für diese Fehler passende Ansätze ausgewählt, angepasst und auf reale Messdaten angewandt. Hierbei wurde auch betrachtet, zu welchen Zeitpunkten und auf welcher Plattform (d.h. Position, Schnittstellen, Einbindung und Art des Computers) die Überwachung stattfinden kann.

Ein Fehler liegt vor, wenn etwas negative Auswirkung auf Verschleiß, Verbrauch, thermischen Komfort, Sicherheit und / oder Kosten hat, dies beinhaltet den nicht bedarfsgerechten Betrieb. Die Komplexität der Heizungsanlagen in größeren Nicht-Wohngebäuden stellt eine Hürde bei der Fehlerdiagnose und -behebung dar. Die Vorteile der offline Fehlererkennung überwiegen für diesen Anwendungsfall den Nachteilen gegenüber der online Erkennung. Das beste Kosten- / Nutzenverhältnis ergibt sich bei der Verwendung der für die Regelung der Heizungsanlage benötigten Sensoren und Datenpunkte, ergänzt mit Wärmemengenzählern oder Volumenströmen der wichtigsten Komponenten und den Rücklauftemperaturen größerer Heizkreise und Bereiche.

Aus der Vielzahl der identifizierten Betriebsfehler wurde herausgearbeitet, dass sich für die Entwicklung und Erprobung von Fehlererkennungsalgorithmen die Erkennung von Komponentendefekten, Handeingriffen und (mangelhaften) Umbauten besonders eignen. Die betreffenden Teilsysteme sind die Wärmeerzeugung, dabei besonders Blockheizkraftwerke und Kesselanlagen, sowie folgende Komponenten der Wärmeverteilung: Pumpen, Ventile, Klappen und das Rohrnetz im allgemeinen.

Die Methoden konnten in drei Bereiche eingeteilt werden: die manuelle Prüfung mit Expertenwissen sowie die automatisierte Prüfung, die auf signalgestützten und modellbasierten Ansätzen aufbauen kann.

Bei der **expertenbasierten** Prüfung liegt der Fokus darin, dem Nutzer die Betriebsdaten in einer Form aufzubereiten, dass er sie mit wenig Aufwand visuell prüfen kann. Die hauptsächlich verwendeten Grafiktypen sind Zeitreihenplots, Streudiagramme und Rasterdiagramme. Trotz aufwändiger Aufbereitung, z. B. strukturiert auf einer webbasierten Oberfläche, hat sich der Kostenfaktor durch den hohen Zeitaufwand einer Person mit fundiertem Fachwissen bestätigt. Die Betriebserfahrung zeigt, dass das routinemäßige Prüfen von vordefinierten Grafiken eine Vielzahl von Fehlern aufdeckt. Allerdings werden auf Grund von mangelnder Aufmerksamkeit oder Zeitdruck auch Fehler übersehen. Der Ansatz eignet sich, wie erwartet, nicht für die regelmäßige Prüfung großer Datenmengen. Das Prüfen mit Expertenwissen bleibt unverzichtbar für Fehler, für die kein Automatisierungsansatz gefunden werden kann oder wo der Automatisierungsaufwand in keinem Verhältnis zum Nutzen steht. Ein Beispiel sind Fehler, die so individuell sind, dass ein äußerst seltenes oder einmaliges Auftreten angenommen werden kann.

Die Dateneingangskontrolle ist eine **signalgestützte** Art der Fehlererkennung, die eine Grundlage für die weitere Nutzung der Betriebsdaten legt. Die Prüfung auf Vollständigkeit, Veränderung und Grenzwertüberschreitungen funktioniert problemlos, wenn Schwellwerte sinnvoll definiert werden können. Die Prüfung auf Datenausfall funktioniert nur für Messpunkte, deren Werte sich kontinuierlich ändern. In den anderen Fällen kann nicht unterschieden werden, ob der letzte bekannte Wert weitergeschrieben wird, weil der Messpunkt ausgefallen ist und keine neuen Werte übermittelt, oder ob er sich tatsächlich nicht geändert hat. Die für die Prüfung notwendige Konfiguration und Grenzwerte müssen für jeden Datenpunkt manuell mit Fachwissen definiert werden. Bei der Verwendung von standardisierten Datenpunktbezeichnungen, angelehnt an DIN 6779-12, kann dieser Prozess unterstützt werden, indem für die Art des Datenpunktes jeweils erwartete Prüfungsarten und Grenzwerte hinterlegt werden. Die regelbasierte Fehlererkennung kann auf Datenbankebene eingerichtet werden und zuverlässig nach dem Datenabruf ausgeführt werden.

Es konnten 17 Regeln erarbeitet werden, die eine Vielzahl von Fehlern abdecken. Bei systematischem Aufbau der Datenpunktbezeichnungen und mit einer allgemeingültigen Definition von Grenzwerten könnten einige der Regeln automatisiert eingerichtet werden. Die aus der Literatur herausgearbeiteten Eigenschaften der regelbasierten Prüfung bestätigen sich in der Praxis. Sie sind hervorragend dazu geeignet, einfache Überprüfungen vorzunehmen und schnell Abweichungen und Fehler anzuzeigen. Dem Nutzer kann die tägliche Routineüberwachung auf bekannte Fehler abgenommen werden. Bei Verknüpfungen mehrerer Komponenten wird die Programmierung der Routinen umfangreich und unübersichtlich. Für die Definition und Anpassung der Regeln ist Expertenwissen notwendig. Meist ist bei signalbasierter Fehlererkennung nur eine Überprüfung der statischen Zustände möglich. Auch die häufigsten Anwendungsfehler bestätigen sich. Regeln wurden fehlerhaft definiert oder Randbedingungen und wechselnde Betriebszustände wurden nicht ausreichend beachtet. Besonders über die wechselnden Betriebszustände, z. B. Sommer- und Winterbetrieb, kommt es zu häufigen Fehlalarmen. Die Definition der Schwellwerte ist eine Herausforderung und zeigt weiteren Forschungsbedarf. Trotz dieser Probleme hat sich die Regelprüfung als unverzichtbarer Bestandteil der Praxis herausgestellt. Die einfache Anwendbarkeit und Erweiterbarkeit sorgt dafür, dass sie einen Teil der expertenbasierten Prüfung ersetzen konnte.

Tensoren und deren Zerlegung können zur Fehlererkennung genutzt werden. Es konnte gezeigt werden, dass die Tensorfaktoren komprimiert wichtige strukturelle Eigenschaften des zu prüfenden Systems wiedergeben. In Abhängigkeit von einem festen Raster können Betriebsdaten auf Absenkbetrieb oder ähnliches geprüft werden. Weiterhin können Tensoren genutzt werden, um Kennfelder von erwarteten Werten abzubilden, beispielsweise von Verbrauchswerten in Abhängigkeit von Tag, Uhrzeit und Außentemperatur. Die Methodik kann ihre Stärken um so mehr zeigen, je mehr Struktur und je weniger Betriebsfehler und Störgrößen in den Anlerndaten vorkommen. Ist die Struktur nicht ausreichend, fehlerbehaftet oder wurde der Rang falsch gewählt, kommt es zu falschen Werten und Auswertungen.

Bei der **modellbasierten** Fehlererkennung wird das Nominalverhalten eines Systems ausreichend genau abgebildet und mit dem realen Systemverhalten verglichen. Fehler verändern das Eingangs- und Ausgangsverhalten des betroffenen Systems. Das Erstellen und Parametrisieren von Modellen erfordert Trainingsdaten des korrekten Betriebs oder gute physikalische Kenntnisse des Prozesses. Es werden verschiedene

Ansätze zur Modellbildung sowie zur Residuengenerierung und -auswertung vorgestellt.

Um die Nichtlinearität und teilweise fehlende Betriebsdaten bei der Modellbildung berücksichtigen zu können, wurde ein multi-lineares Modell vorgestellt. Seine Eigenschaften werden am Beispiel eines Kessels gezeigt. Durch Quantisierung der Partitionierungssignale können multiple lineare Zustandsraummodelle um ihren jeweiligen Arbeitspunkt bestimmt werden. Diese können in einer Tensorstruktur abgelegt werden. Durch eine Tensordekomposition können bei ausreichender Datengrundlage die Parameter der fehlenden Betriebsmodi ermittelt werden. Mit Paritätsgleichungen erfolgt die Fehlererkennung. Weiterer Forschungsbedarf besteht im Hinblick auf eine robuste Parameteridentifikation von Zustandsraummodellen höherer Ordnung. Um die Vervollständigung des Parametertensors mittels Tensordekomposition zu nutzen, müssen die Zustände zwischen den verschiedenen Betriebsmodi vergleichbar sein. Ist die Struktur nicht ausreichend oder der Rang falsch gewählt, kommt es zu falschen Werten und Auswertungen. Probleme bei der Parameteridentifikation haben Auswirkung auf die Nutzbarkeit der Tensorstruktur. Für die Tensorzerlegung besteht weiter Forschungsbedarf, um automatisiert den korrekten Rang zu bestimmen. Es sollte untersucht werden, ob die in der Struktur des Parametertensors enthaltene Information für eine verbesserte Näherung genutzt werden kann. Es wurde nicht systematisch untersucht, wie die Wahl der Startwerte der Faktormatrizen das Optimierungsergebnis beeinflussen.

Weiterhin wird gezeigt, wie ein Grey-Box-Modell für die Fehlererkennung genutzt werden kann. Ein VerbrauchermodeLL wird mittels thermischen Gleichungen erstellt. Das vereinfachte Drei-Massen-Gebäudemodell bildet das Verhalten eines Raumes ab. Über einen Vergleich des Modellausgangs mit dem realen Betrieb, durch die Betrachtung des Ergebnisses einer Parameterschätzung oder von Simulationsergebnissen können Fehler erkannt und teilweise identifiziert werden. Der Vergleich gleichwertiger Räume verbessert das Ergebnis. Dynamische Eigenschaften und äußere Einflüsse, die nicht im Modell abgebildet werden, beeinflussen die Nutzbarkeit der modellbasierten Fehlererkennung negativ. Es besteht weiterer Forschungsbedarf zur allgemeingültigen Definition der Fehlerschwellwerte.

Aus der Auswertung der Fehlerdatenbank folgt, dass etwa 60% der Fehler allgemeingültig sind und für eine automatisierte Überprüfung in Frage kommen. Für knapp 70% der Fehler ist theoretisch eine automatisierte Erkennung möglich. Für etwa ein Drittel der Einträge wurde diese Erkennung auch umgesetzt und täglich ausgeführt. Die nächsten Schritte für eine verbesserte Nutzung in der Praxis sind - neben der Lösung der für die jeweiligen Methoden genannten Schwierigkeiten - die Einrichtung der Algorithmen weiter zu vereinfachen und den Umgang mit erkannten Fehlern zu automatisieren. Dem Nutzer wird ein großer Mehrwert geboten, wenn neben der Erkennung auch die komplette Diagnose automatisiert durchgeführt wird und ihm Handlungsoptionen und -vorschläge aufgezeigt werden.

Mit detailliertem Wissen über die beabsichtigte Funktionsweise der Komponenten und (Teil-)Systeme können Regeln definiert werden, welche die Wechselwirkungen überprüfen. Bei ausreichender Datengrundlage kann eine modellbasierte Prüfung der dynamischen Vorgänge erfolgen, beispielsweise über die Nutzung von multi-linearen Zustandsraummodellen. In Tabelle 5.8-1 wird für die in Kapitel 5.2 beschriebenen Fehlerkategorien dargestellt, welche Ansätze zur Fehlererkennung geeignet sind.

Tabelle 5.8-1: Zuordnung von Fehlerkategorien und Kategorien

	Bezeichnung / Beschreibung
N	Nutzungszeiten - signalbasierte Ansätze Die Erkennung von auf Fehlern im Bereich der Nutzungszeiten ist am besten über die Prüfung der Einhaltung von Zeitprogrammen umsetzbar. Die erwarteten Zeitprogramme können über Expertenwissen definiert werden, z. B. aus Raumbelungsplänen. Für eine bestehende und einregulierte Anlage kann das Zeitprogramm auch aus den Messdaten, z. B. den Leistungsdaten, erkannt und für die Zukunft als Referenz genommen werden. Die Überprüfung erfolgt mit Vergleich von Zeitprogrammen, Betriebssignalen, Verbrauchsprofilen oder Präsenzsignalen mit dem erwarteten Zeitprogramm.
A	Abstimmung Komponenten - signalbasierte Ansätze Die Abstimmung von Komponenten kann über mit Expertenwissen definierte Regeln geprüft werden.
H	Hydraulischer Abgleich - signalbasierte Ansätze Überprüfbar wird der Hydraulische Abgleich durch die Definition einer erwarteten Rücklauftemperatur in Abhängigkeit von der Vorlauftemperatur und der Art des Verbrauchers. Modellbasiert können Fehler erkannt werden, wenn ausreichend Daten für einen Referenzbetrieb vorhanden sind.
K	Komponenten(-teil-)defekt - signalbasierte und modellbasierte Ansätze Neben Grenzwertüberprüfungen und einer regelbasierten Prüfung ist der Vergleich von Nominalmodell und Betriebsdaten erfolgversprechend.
S	Schwingende Regelkreise - signalbasierte Ansätze Schwingende Regelkreise können über eine Frequenzanalyse (nicht Bestandteil dieser Arbeit) oder über die Korrelation von Soll- zu Istwerten erkannt werden.
L	Einstellung lokaler Komponenten - signalbasierte und modellbasierte Ansätze Analog zum Erkennen von Defekten ist für diese Fehlerkategorie neben expertenwissenbasierten Regeln eine modellbasierte Fehlererkennung zielführend, welche die Betriebsdaten auf Abweichung vom erwarteten Nominalverhalten prüft.
Z	Zugestellte Verbraucher - modellbasierte Ansätze, Redundanz Mangelhafte Wärme- oder Kälteübertragung an den Raum kann über den Vergleich mehrerer, in ihrem Aufbau vergleichbaren Räumen erkannt werden. Bei einer ausreichenden Anzahl vergleichbarer Räume ist das Vorgehen modellbasiert automatisierbar.
P	Planung / Ausführung - Expertenwissen Fehler in der Planung können von Experten oder mit expertenwissenbasierten Regeln erkannt werden, wenn sie erkennbaren Auswirkungen auf den Betrieb von Komponenten haben. Fehler in der Ausführung können erkannt werden, wenn die Planungsunterlagen ausreichend Information über den beabsichtigten Betrieb beinhalten. Der Abgleich von Planung und Betrieb kann von Experten oder durch von Experten definierten Regeln überprüft werden. Grey-Box Modelle können definiert werden. Allerdings ist aufgrund der Individualität dieser Fehler eine automatisierte Erkennung von Planungs- und Ausführungsfehlern nicht Ziel dieser Arbeit. Es wird davon ausgegangen, dass eine einregulierte Anlage vorliegt, in der diese Fehler behoben wurden.

	Bezeichnung / Beschreibung
D	Daten - signalbasierte Ansätze In einer Dateneingangskontrolle können die Daten automatisch auf Vollständigkeit und Grenzwerte geprüft werden. Datenpunkte, für die mehr als ein Wert pro Tag erwartet wird, wie z. B. die Außentemperatur, können auf Veränderung geprüft werden und es wird eine Meldung erzeugt, wenn sie konstant geblieben sind, z. B. bei Sensorausfall oder Störungen der Datenerfassung. Werte, die konstant bleiben sollen, wie z. B. Solltemperaturen oder Störmeldungen, können auf Veränderung geprüft werden, d.h. es erfolgt eine Meldung bei Änderung des Wertes.

Literaturverzeichnis

- [1] AKIN, Ömer ; FERRETTI, Natascha ; CHOINIERE, Daniel ; CLARIDGE, David: *Annex 47 Report 4: Flow Charts and Data Models for Initial Commissioning of Advanced and Low Energy Building Systems*. November 2011
- [2] BOŠKOVIĆ, Jovan D. ; MEHRA, Raman K.: Failure detection, identification and reconfiguration in flight control. In: *Fault Diagnosis and Fault Tolerance for Mechatronic Systems: Recent Advances*. Springer, 2003, S. 129–167
- [3] BRAMBLEY, Michael R. ; HAVES, Philip ; McDONALD, Sean C. ; TORCELLINI, Paul ; HANSEN, David G. ; HOLMBERG, David ; ROTH, Kurt: Advanced sensors and controls for building applications: Market assessment and potential R&D pathways / Pacific Northwest National Laboratory (PNNL), Richland, WA (US). 2005. – Forschungsbericht
- [4] BRAUN, James E.: Automated fault detection and diagnostics for the HVAC&R industry. In: *HVAC&R Research* 5 (1999), Nr. 2, S. 85–86
- [5] CICHOCKI, A. ; ZDUNEK, R. ; PHAN, A. ; AMARI, S.: *Nonnegative matrix and tensor factorizations*. Wiley, Chichester, 2009
- [6] CICHOCKI, Andrzej ; MANDIC, Danilo ; DE LATHAUWER, Lieven ; ZHOU, Guoxu ; ZHAO, Qibin ; CAIAFA, Cesar ; PHAN, Huy A.: Tensor decompositions for signal processing applications: From two-way to multiway component analysis. In: *IEEE Signal Processing Magazine* 32 (2015), Nr. 2, S. 145–163
- [7] DEXTER, Arthur ; PAKANEN, Jouko u. a.: *Demonstrating automated fault detection and diagnosis methods in real buildings*. Technical Research Centre of Finland (VTT), 2001
- [8] DING, Steven X.: *Model-based fault diagnosis techniques*. Springer, 2008
- [9] EMN ENERGIEMANUFAKTUR NORD: *Wirtschaftliches Heizen - Handbuch zum Ermitteln von Einsparpotenzialen in Heizungsanlagen*. 2015
- [10] FANAEE-T, Hadi ; GAMA, João: Tensor-based anomaly detection: An interdisciplinary survey. In: *Knowledge-Based Systems* 98 (2016), S. 130–147
- [11] FERRETTI, Natascha M. ; MIYATA, Masato ; BAUMANN, Oliver: A Retrospective on the Impact of Annex 40 and Annex 47 Research on the International State of Building Commissioning. In: *Energy and Buildings* (2017)
- [12] FISCH, MN ; PLESSER, S ; BREMER, C: EVA - Evaluierung von Energiekonzepten für Bürogebäude. In: *Braunschweig: Institut für Gebäude- und Solartechnik - IGS* (2007)

- [13] FRIEDMAN, H ; CLARIDGE, D ; CHOINIÈRE, D ; MILESI-FERRETTI, N: Annex 47 Report 3: Commissioning Cost-Benefit and Persistence of Savings. In: *National Institute of Standards and Technology, Technical Note 1727* (2011)
- [14] GERTLER, Janos: Analytical redundancy methods in fault detection and isolation. In: *Preprints of IFAC/IMACS Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Processes SAFEPROCESS'91*, 1991, S. 9–21
- [15] HYVÄRINEN, Juhani ; KÄRKI, Satu: *IEA Annex 25 - Real Time Simulation of HA-VAC Systems for Building Optimisation, Fault Detection and Diagnosis - Building Optimization and Fault Diagnosis Source Book*. 1996
- [16] ISAKSON, Per: Commissioning tools for improved energy performance. In: *Results of IEA ECBCS Annex 40* (2005)
- [17] ISERMANN, Rolf: *Fault-diagnosis systems: an introduction from fault detection to fault tolerance*. Springer Science & Business Media, 2006
- [18] ISERMANN, Rolf ; BALLE, Peter: Trends in the application of model-based fault detection and diagnosis of technical processes. In: *Control engineering practice* 5 (1997), Nr. 5, S. 709–719
- [19] JACOB, Dirk ; LICHTENBERG, Gerwald: Ausblick: Automatisierte Gebäudebetriebsoptimierung. In: *ModQS Workshop - Optimierung von Heizungssystemen*, 2012
- [20] JAGEMAR, Lennart ; OLSSON, Daniel ; SCHMIDT, F: The EPBD and continuous commissioning. In: *Project Report, Building EQ, EIE/06/038/SI2 448300* (2007)
- [21] JAGPAL, Rajinder: *EBC Annex 34 - Computer Aided Evaluation of HVAC System Performance - Technical Synthesis Report: Computer Aided Evaluation of HVAC System Performance*. 2006
- [22] KATIPAMULA, S. ; BRAMBLEY, M.R.: Methods for Fault Detection, Diagnostics, and Prognostics for Building Systems - A Review, Part I. In: *HVAC&R Research* 11 (2005), Januar, Nr. 1, S. 3–25
- [23] KATIPAMULA, Srinivas ; BRAMBLEY, Michael R.: Methods for Fault Detection, Diagnostics, and Prognostics for Building Systems - A Review, Part II. In: *HVAC&R Research* 11 (2005), Nr. 2, S. 169–187
- [24] KIERS, Henk A.: Towards a standardized notation and terminology in multiway analysis. In: *Journal of chemometrics* 14 (2000), Nr. 3, S. 105–122
- [25] KIM, Woohyun ; KATIPAMULA, Srinivas: A review of fault detection and diagnostics methods for building systems. In: *Science and Technology for the Built Environment* (2017), S. 1–18
- [26] KOLDA, Tamara G. ; BADER, Brett W.: Tensor decompositions and applications. In: *SIAM review* 51 (2009), Nr. 3, S. 455–500
- [27] KRUPPA, K.: Dokumentation Matlab HeatLib - Zur Verwendung mit Matlab / Institut für Regelungstechnik. TU Hamburg-Harburg, 2014. – Dokumentation

- [28] LEGRIS, C ; MILESI-FERRETTI, N ; CHOINIÈRE, D: Annex 47 Report 1: Commissioning Overview. In: *National Institute of Standards and Technology, Technical Note 1727* (2010)
- [29] LICHTENBERG, Gerwald: Modellbasierter Reglerentwurf komplexer Gebäudeautomationssysteme. In: *OBSERVE Workshop - Nichtwohngebäude energieeffizient betreiben*, 2017
- [30] LIDDAMENT, Martin: *IEA Annex 25 - Real Time Simulation of HAVAC Systems for Building Optimisation, Fault Detection and Diagnosis - Technical Synthesis Report*. 1999
- [31] LJUNG, Lennart: *System identification toolbox: user's guide*. 2016 https://de.mathworks.com/help/pdf_doc/ident/ident.pdf
- [32] LUNZE, Jan: *Automatisierungstechnik: Methoden für die Überwachung und Steuerung kontinuierlicher und ereignisdiskreter Systeme*. Oldenbourg Verlag, 2012
- [33] LUNZE, Jan: *Regelungstechnik 1 - Systemtheoretische Grundlagen, Analyse und Entwurf einschleifiger Regelungen*. Bd. 10. Springer, 2014
- [34] LUSKAY, Larry ; BRAMBLEY, Michael ; KATIPAMULA, Srinivas: Methods for Automated and Continuous Commissioning of Building Systems / Air-Conditioning and Refrigeration Technology Institute (US). 2003. – Forschungsbericht
- [35] MÜLLER, Thorsten ; KRUPPA, Kai ; LICHTENBERG, Gerwald ; RÉHAULT, Nicolas: Fault detection with qualitative models reduced by tensor decomposition methods. In: *IFAC-PapersOnLine* 48 (2015), Nr. 21, S. 416–421
- [36] MURRAY-SMITH, Roderick ; JOHANSEN, Tor A.: *Multiple Model Approaches to Modelling and Control*. Taylor and Francis, London, 1997
- [37] NEUMANN, C. ; JACOB, D. ; BURHENNE, S. ; FLORITA, A. ; BURGER, E. ; SCHMIDT: ModBen–Methoden zur modellbasierten Betriebsanalyse von Bestandsgebäuden. Forschungsbericht, 2011
- [38] NEUMANN, Christian: All models are wrong – but some are useful, Praxisorientierte Methode zur modellbasierten Betriebsführung. In: *ENOB-Workshop - Konzepte zur optimierten Betriebsführung von Gebäuden*, 2006
- [39] NEUMANN, Christian ; HARUNORI, Yoshida ; CHOINIÈRE, Daniel ; FERRETTI, Natascha M.: Annex 47 Report 2: Commissioning Tools for Existing and Low Energy Buildings. In: *National Institute of Standards and Technology, Technical Note* (2010)
- [40] NYBERG, Mattias ; NYBERG, C M.: Model Based Fault Diagnosis: Methods, Theory, and Automotive Engine Applications, PhDthesis. (1999)
- [41] PANGALOS, Georg: *Model-based Controller Design Methods for Heating Systems*, Hamburg University of Technology, dissertation, 2015. <http://tubdok.tub.tuHH.de/handle/11420/1327>

- [42] PANGALOS, Georg ; EICHLER, Annika ; LICHTENBERG, Gerwald: Tensor Systems - Multilinear Modeling and Applications. In: *Simultech 2013 3rd International Conference on Simulation and Modeling Methodologies, Technologies and Applications, Reykjavik* (2013)
- [43] PANGALOS, Georg ; LICHTENBERG, Gerwald: Approach to boolean controller design by Algebraic Relaxation for heating systems. In: *IFAC Proceedings Volumes* 45 (2012), Nr. 9, S. 210–215
- [44] PATTON, Ron J. ; FRANK, Paul M. ; CLARK, Robert N.: *Issues of fault diagnosis for dynamic systems*. Springer Science & Business Media, 2000
- [45] PLATH, Helge: *Entwicklung von automatisierbaren Regeln zur Fehlererkennung im heizungstechnischen Gebäudebetrieb*, Institut für Management ländlicher Räume (MLR) der Agrar- und Umweltwissenschaftlichen Fakultät der Universität Rostock, Diss., 2009
- [46] REHAULT, N. ; LICHTENBERG, G. ; SCHMIDT, F. ; HARMSSEN, A.: Modellbasierte Qualitätssicherung des energetischen Gebäudebetriebs (ModQS). Abschlussbericht. 2013. – Forschungsbericht
- [47] SCHMIDT, Michael ; AROLD, Jörg: Expertensystem zur Identifikation und Definition niedriginvestiver Massnahmen zur Senkung des Energieumsatzes und des Schadstoffausstosses im Gebäudebestand - EXECO2 / Universität Stuttgart, Institut für GebäudeEnergetik. 2011. – Forschungsbericht
- [48] SCHRAMEK, Ernst-Rudolf: *Taschenbuch für Heizung + Klimatechnik*. Oldenbourg, 2003. – ISBN 3–486–26534
- [49] SEWE, E. ; HARMSSEN, A. ; PANGALOS, G. ; LICHTENBERG, G.: Umsetzung eines neuen Konzepts zur Mehrkesselregelung mit Durchflusssensoren. In: *HLH Lüftung/Klima - Heizung/Sanitär - Gebäudetechnik* 1 (2012), S. 37 –42
- [50] SEWE, Erik ; PANGALOS, Georg ; LICHTENBERG, Gerwald: Fault Detection for Heating Systems using Tensor Decompositions of Multi-Linear Models. In: *7th International Conference on Simulation and Modeling Methodologies, Technologies and Applications, Madrid* (2017)
- [51] ULICKEY, Joy ; FACKLER, T ; KOEPEL, E ; SOPER, J: Building Performance Tracking in Large Commercial Buildings: Tools and Strategies. In: *California Energy Commissioning: Berkeley, CA, USA* (2010)
- [52] VAN OVERSCHEE, Peter ; DE MOOR, BL: *Subspace identification for linear systems: Theory - Implementation - Applications*. Springer Science & Business Media, 2012
- [53] VENKATASUBRAMANIAN, Venkat ; RENGASWAMY, Raghunathan ; KAVURI, Surya N.: A review of process fault detection and diagnosis: Part II: Qualitative models and search strategies. In: *Computers & Chemical Engineering* 27 (2003), Nr. 3, S. 313–326
- [54] VENKATASUBRAMANIAN, Venkat ; RENGASWAMY, Raghunathan ; KAVURI, Surya N. ; YIN, Kewen: A review of process fault detection and diagnosis: Part

- III: Process history based methods. In: *Computers & chemical engineering* 27 (2003), Nr. 3, S. 327–346
- [55] VENKATASUBRAMANIAN, Venkat ; RENGASWAMY, Raghunathan ; YIN, Kewen ; KAVURI, Surya N.: A review of process fault detection and diagnosis: Part I: Quantitative model-based methods. In: *Computers & chemical engineering* 27 (2003), Nr. 3, S. 293–311
- [56] VERVLiet, N. ; DEBALS, O. ; SORBER, L. ; LATHAUWER, L. D.: Breaking the Curse of Dimensionality Using Decompositions of Incomplete Tensors: Tensor-based scientific computing in big data analysis. In: *IEEE Signal Processing Magazine* 31 (2014), Sept, Nr. 5, S. 71–79. <http://dx.doi.org/10.1109/MSP.2014.2329429>. – DOI 10.1109/MSP.2014.2329429. – ISSN 1053–5888
- [57] VERVLiet, Nico ; DEBALS, Otto ; SORBER, Laurent ; VAN BAREL, Marc ; DE LATHAUWER, Lieven: Tensorlab User Guide. (2016)
- [58] ZHOU, Yimin ; XU, Guoqing ; ZHANG, Qi: Overview of fault detection and identification for non-linear dynamic systems. In: *Information and Automation (ICIA), 2014 IEEE International Conference on* IEEE, 2014, S. 1040–1045

Anhang

A Fehlerdatenbank

Die Datenbank zur Beschreibung von Fehlern in Heizungsanlagen enthält folgende Felder:

- Fehlername
 - Freitext
- Gebäude in dem der Fehler auftritt
 - Freitext
- Benennung Fehler
 - Freitext
- Beschreibung des Fehlers
 - Freitext
- Fehlerursache
 - Freitext
- Auswirkung des Fehlers
 - Freitext
- Auswirkung des Fehlers in Kosten oder Mehrverbrauch beziffert
 - Freitext
- Wird der Nutzerkomfort beeinträchtigt?
 - ja / nein
- Kommt es zu Mehrverbrauch?
 - ja / nein
- Kommt es zu Datenverlust?
 - ja / nein
- Verursacht der Fehler erhöhten Verschleiss?
 - ja / nein
- In welchen der folgenden Bereiche kann der Fehler eingeordnet werden?
 - Erzeugung
 - Verteilung
 - Nutzung

- Daten
- In welcher Komponente bzw. welchem Teilsystem tritt der Fehler auf?
 - Freitext
- In welche Fehlerkategorie kann der Fehler eingeordnet werden?
 - Abstimmung Komponenten
 - Daten
 - Einstellung lokaler Komponenten
 - falsche Sollwerte
 - Hydraulischer Abgleich
 - Komponenten(-teil-)defekt
 - Nutzungszeiten
 - Planungs- oder Ausführungsfehler
 - schwingende Regelkreise
 - zugestellte Verbraucher
 - sonstiges (d.h. nicht in eine der vorgenannten Kategorien einteilbar)
- Möglichkeiten und Maßnahmen zur Behebung des Fehlers
 - Freitext
- Status der Bearbeitung
 - von "Fehler erkannt" bis "Fehler behoben"
- Datum oder Zeitraum, in dem der Fehler auftritt
- Ticketnummer zu diesem Fehler im PLENUM-Ticketsystem
- Datum, zu dem der Fehler in der Tabelle aufgenommen wurde
- Wodurch wurde man auf den Fehler aufmerksam?
 - beispielsweise durch manuelle Analyse der Betriebsdaten, durch automatische Prüfungen oder durch Nutzerrückmeldung
- Quelle
 - Analyse PLENUM, ansonsten Verweis auf Literatur
- Sonstige Anmerkungen
 - Freitext

In fünf Feldern soll eine Einschätzung dazu abgegeben werden, wie häufig der Fehler auftritt, wie schwer der Fehler ist, wie hoch die Schwierigkeit der Detektion ist, wie hoch der Mehrverbrauch und wie hoch die Folgekosten sind. Für diese fünf Felder gibt es die Auswahlmöglichkeiten hoch, mittel, niedrig, kein(e), Einzelfall, nicht ausfüllbar. Es hat sich im Laufe der Nutzung der Fehlerdatenbank herausgestellt, dass für die vorliegenden Fehler, zur Verfügung stehenden Messdaten und Detailinformationen es nicht möglich ist, diese Felder in ausreichender Belastbarkeit zu füllen. Die Information, ob ein Mehrverbrauch verursacht wird, wird weiterhin erfasst, allerdings ohne Abstufungen.

Des weiteren sind Felder vorhanden, in denen die folgenden Fragen zur automatisierten Überprüfung beantwortet werden sollen:

- Ist der Fehler anhand der vorhandenen Messdaten erkennbar?
 - ja / nein

Anmerkung: es gibt Fehler, die beispielsweise vom Gebäudenutzer gemeldet wurden oder bei einer Begehung vor Ort erkannt wurden, die nicht in den Betriebsdaten erkennbar sind. Wenn notwendig, wurden Nachrüstmaßnahmen veranlasst.

- Ist der Fehler allgemeingültig, d.h. kann er in einer anderen Anlage in dieser Form vorkommen oder ist es ein Einzelfall für den keine automatische Überwachung lohnt?
 - ja / nein
- Welche Datenpunkte sind für die Erkennung notwendig?
 - Freitext
- Mit welcher Regel kann der Fehler erkannt werden?
 - Freitext
- Mit welchem modellbasierten Ansatz kann der Fehler gefunden werden?
 - Freitext
- Ist eine automatische Überprüfung der Daten für diesen Fehler implementiert?
 - ja / nein

B Fehlerliste

Dieser Abschnitt nennt typische Fehler, die während der Erstellung dieser Arbeit erkannt und analysiert wurden. Die Beschreibung der Fehlerkategorien aus Tabelle 5.2-1 und deren allgemeinen Erkennungsansätze aus Tabelle 5.8-1 sind zur verbesserten Übersicht beigelegt. Neben der Bezeichnung der jeweiligen Fehler ist in der Spalte *Beschreibung / Beispiel* ergänzende Information angegeben. Die Spalte *Prüfart* gibt die zu bevorzugende Methodik an, mit der die Daten auf das Vorliegen des Fehlers geprüft werden sollen.

Nutzungszeiten - signalbasierte Ansätze

Komponenten sind in Betrieb, obwohl sie nicht benötigt werden. Häufig werden für die Nutzung von Räumen, Zonen, Gebäuden oder Komponenten nicht angemessene Nutzungszeiten eingestellt. Grenzwerte (Frostschutz, Sommerabschaltung etc.) für außentemperaturabhängige Teilsysteme werden mangelhaft definiert. Durch Anpassung der Parametrierung kann ein meist großes, kostenfreies Einsparpotential genutzt werden. Die Erkennung von auf Fehlern im Bereich der Nutzungszeiten ist am besten über die Prüfung der Einhaltung von Zeitprogrammen umsetzbar. Die erwarteten Zeitprogramme können über Expertenwissen definiert werden, z. B. aus Raumbelegungsplänen. Für eine bestehende und einregulierte Anlage kann das Zeitprogramm auch aus den Messdaten, z. B. den Leistungsdaten, erkannt und für die Zukunft als Referenz genommen werden. Die Überprüfung erfolgt mit Vergleich von Zeitprogrammen, Betriebssignalen, Verbrauchsprofilen oder Präsenzsignalen mit dem erwarteten Zeitprogramm.

Tabelle B-2: Fehler der Kategorie *Nutzungszeiten*

	Bezeichnung	Beschreibung / Beispiel	Prüfart
N1	Fehlende Nachtabenkung	Außerhalb der Nutzungszeiten: Raumtemperatur nicht abgesenkt	signalbasiert (Regel, Tensorfaktor, Erwartungswert)
N2	Fehlende Wochenendabsenkung	Am Wochenende (für nicht genutzte Bereiche): Raumtemperatur nicht abgesenkt	signalbasiert (Regel, Tensorfaktor, Erwartungswert)
N3	Fehlende Ferienabsenkung bei Schulen	In den Ferien: Raumtemperatur nicht abgesenkt	signalbasiert (Regel)
N4	Betriebszeiten Lüftung	Lüftung außerhalb der Raumnutzung in Betrieb	signalbasiert (Regel)
N5	Grenztemperatur Frostschutz	Frostschutztemperatur zu hoch eingestellt (deutlich über der Frostgrenze), Heizregister werden durchflossen, Pumpen in Betrieb etc.	signalbasiert (Regel)

	Bezeichnung	Beschreibung / Beispiel	Prüfart
N6	Betriebszeiten Warmwasserbereitung	Erlaubte Abschaltung von Zirkulation und Warmwasserbereitung wird nicht genutzt	signalbasiert (Regel, Tensorfaktor)
N7	Fehlende Sommerabschaltung	Heizungsanlage auch bei Temperaturen oberhalb der Heizgrenze in Betrieb	signalbasiert (Regel)

Abstimmung Komponenten - signalbasierte Ansätze

In komplexeren Anlagen sind die Komponenten und Teilsysteme häufig nicht richtig aufeinander abgestimmt. Es treten Betriebszustände auf, die nicht beabsichtigt sind und es kommt zu Wechselwirkungen. Dadurch werden Komponenten unnötig belastet und ggf. mehr Energie verbraucht. Die Abstimmung von Komponenten kann über mit Expertenwissen definierte Regeln geprüft werden.

Tabelle B-3: Fehler der Kategorie *Abstimmung Komponenten*

	Bezeichnung	Beschreibung / Beispiel	Prüfart
A1	Regelstrategie bei mehreren Wärmeerzeugern (auch unterschiedlicher Art)	Durch mangelhafte Regelstrategie von mehreren Wärmeerzeugern kein stabiler Betrieb (häufige Startvorgänge), zeitweise Unterversorgung oder ineffiziente Betriebsweisen	signalbasiert (Regel)
A2	Kesselfolgeschaltung (Spezielle Art des Fehlers A1)	Durch mangelhafte Regelstrategie von Mehrkesselanlagen kein stabiler Betrieb (häufige Startvorgänge) oder zeitweise Unterversorgung	signalbasiert (Regel)
A3	Regelstrategie bei Ausfall eines Erzeugers	Durch mangelhafte Regelstrategie für den Ersatz ausgefallener Wärmeerzeuger kein stabiler Betrieb (häufige Startvorgänge) oder zeitweise Unterversorgung	Expertenwissen, signalbasiert (Regel)
A4	Betriebszeiten Pumpen	Nicht benötigte Pumpen werden nicht ausgeschaltet	signalbasiert (Regel)
A5	Abstimmung zwischen Pumpen und Ventilen bzw. Klappen	Pumpen und dazugehörige Ventile werden nicht gekoppelt und arbeiten gegeneinander	signalbasiert (Regel)
A6	Abstimmung zwischen Pumpen und Wärmeerzeugern	Pumpen und dazugehörige Wärmeerzeuger werden nicht gekoppelt	signalbasiert (Regel)

	Bezeichnung	Beschreibung / Beispiel	Prüfart
A7	Pumpenwechsel	Kein Pumpenwechsel bei Doppelpumpen	signalbasiert (Regel)
A8	Schaltung von Ventilen und Absperrklappen	Ventile werden falsch geschaltet und Bereiche nicht versorgt oder hydraulisch komplett abgetrennt (Druckausgleich nicht mehr möglich)	Expertenwissen, signalbasiert (Regel)
A9	Nutzung Heizpatrone	Dauerhafte Nutzung der elektrischen Heizpatrone des Warmwasserbereiters, obwohl die Versorgung über das Wärmenetz möglich ist	signalbasiert (Regel)
A10	Regelstrategie Be- und Entfeuchtung	Gleichzeitiges Be- und Entfeuchten bei Vollklima	signalbasiert (Regel)
A11	Abstimmung zwischen Wärme und Kälte	Bereiche werden gleichzeitig mit Wärme und Kälte versorgt	signalbasiert (Regel)
A12	Regelstrategie Heizen und Kühlen	Keine Umschalthysterese zwischen Heiz- und Kühlbetrieb, besonders bei trägen Systemen wie Betonkernaktivierung	signalbasiert (Regel)

Hydraulischer Abgleich - signalbasierte Ansätze

Durch mangelhafte Hydraulik oder Einstellung der Komponenten fließt in Teilbereichen zu viel oder zu wenig Wasser. Teile der Anlage sind unterversorgt oder es kommt zu unerwünscht bzw. unzulässig hohen Rücklaufftemperaturen. Diese verhindern z. B. einen BHKW-Betrieb, verringern einen Brennwertnutzen oder mindern die übertragbare Leistung bei Fernwärmeversorgung. Überprüfbar wird der Hydraulische Abgleich durch die Definition einer erwarteten Rücklaufftemperatur in Abhängigkeit von der Vorlauftemperatur und der Art des Verbrauchers. Modellbasiert können Fehler erkannt werden, wenn ausreichend Daten für einen Referenzbetrieb vorhanden sind.

Tabelle B-4: Fehler der Kategorie *Hydraulischer Abgleich*

	Bezeichnung	Beschreibung / Beispiel	Prüfart
H1	Abgleich der Wassermenge durch Wärmeerzeuger	Volumenströme nicht entsprechend der Leistung angepasst, es gibt Probleme bei der Abgabe der Wärme oder beim Einhalten der Vorlauftemperatur	Expertenwissen, signalbasiert (Regel), modellbasiert
H2	Durchfluss in Hydraulischer Weiche	Volumenströme auf Primär- oder Sekundärseite zu groß, damit Probleme mit Rücklaufanhebung oder beim Einhalten der Soll-Vorlauftemperatur	signalbasiert (Regel)

	Bezeichnung	Beschreibung / Beispiel	Prüfart
H3	Durchfluss durch Pufferspeicher	Der Volumenstrom ist zu hoch, es kann sich keine Temperaturschichtung einstellen	signalbasiert (Regel)
H4	Durchfluss bei Wärmeübertragern	Primär- und Sekundärvolumenstrom sind nicht abgeglichen, dadurch wird eine Rücklaufanhebung oder zu geringe Wärmeübertragung verursacht	signalbasiert (Regel)
H5	Pumpenleistung (siehe auch Fehler A4)	Zu hohe oder niedrige Pumpenleistung. Es kommt zu Strömungsgeräuschen oder Unterversorgung von Bereichen	signalbasiert (Regel)
H6	Strömungswiderstand in Wärmeverteilung	Zu große Widerstände in der Strecke. Defekte Rückschlagklappen, blockierte Pumpen usw. verhindern, dass ausreichend Wasser fließt	Expertenwissen
H7	Fehlende Rückschlagklappen	Bereiche werden teilweise rückwärts durchflossen, dadurch Unterversorgung anderer Bereiche	Expertenwissen
H8	Hydraulische Einbindung Lüftungsanlagen	Bei volumenkonstanter Regelung oder bei Überströmeinrichtungen fließt ungenutztes Wasser (Wärme) im Kurzschluss zurück und verursacht eine Rücklaufanhebung.	signalbasiert (Regel)
H9	Abgleich von Heizflächen	Heizflächen sind nicht abgeglichen, es kommt zur Rücklaufanhebung und/oder Unterversorgung von Bereichen	signalbasiert (Regel), modellbasiert
H10	Größe der Heizflächen	Heizflächen zu klein dimensioniert, Übertragerfläche reicht nicht aus den Raum zu temperieren, dadurch voll geöffnetes Regelventil und hohe Rücklauftemperatur	Expertenwissen

Komponenten(-teil-)defekt - signalbasierte und modellbasierte Ansätze

Komponenten fallen aus und erfüllen nicht mehr ihre Funktion. Neben Grenzwertüberprüfungen ist der Vergleich von Nominalverhalten und Messdaten erfolgversprechend.

Tabelle B-5: Fehler der Kategorie *Komponenten(-teil-)defekt*

	Bezeichnung	Beschreibung / Beispiel	Prüfart
K1	Sensordefekt	z. B. Kabel durchtrennt, Sensor nicht mehr an korrekter Position montiert, Elektronikfehler	Expertenwissen, signalbasiert (Dateneingangskontrolle)
K2	Alterung Wärmeübertrager	Wärmeübertrager sind verschmutzt, die Übertragungsleistung sinkt, der Strömungswiderstand steigt	signalbasiert (Regel)
K3	Fehlfunktion der Wärmepumpe	z. B. Kühlen im Heizfall, Ausfall	Expertenwissen, signalbasiert (Regel)
K4	Ausfall BHKW	Motorprobleme, Verschleiss	modellbasiert
K5	Ausfall Kessel	Rost, Spannungsrisse, Verschleiss	modellbasiert
K6	Pumpendefekt	Verschleiss, fehlende Anti-Blockierschaltung	signalbasiert (Regel)
K7	Ausfall Klappen oder Ventile (siehe auch Fehler L5, L6)	Verschleiss, häufige Ursache: fehlende Anti-Blockierschaltung	signalbasiert (Regel), modellbasiert
K8	Klappen oder Ventile schließen nicht richtig	Verschleiss	Expertenwissen
K9	Rückschlagklappen schließen nicht mehr richtig	Verschleiss	Expertenwissen
K10	Druckhaltung defekt	Statischer Druck nicht mehr im gewünschten Wertebereich	signalbasiert (Regel)
K11	Wasserverlust / Leckage	Druckverlust und ggf. Wasserschaden durch Wasseraustritt an schadhaften Komponenten oder Rohrleitungen	signalbasiert (Regel)
K12	Motorventile oder Thermostate	Defekt, meist mechanisch auf Grund von Fehlbedienung oder Vandalismus	signalbasiert (Regel), modellbasiert
K13	Legionellenvorsorge	Vorsorge im Warmwasserbereiter wird nicht durchgeführt	signalbasiert (Regel)

Schwingende Regelkreise - signalbasierte Ansätze

Es wird kein stabiler Betrieb in Regelkreisen erreicht. Schwingende Regelkreise können über eine Frequenzanalyse (nicht Bestandteil dieser Arbeit) oder über die Korrelation von Soll- zu Istwerten erkannt werden.

Tabelle B-6: Fehler der Kategorie *Schwingende Regelkreise*

	Bezeichnung	Beschreibung / Beispiel	Prüfart
S1	Ventile nicht im Regelbereich	Wassermenge kann nicht ausreichend geregelt werden, es kommt zu schwankenden Temperaturen	signalbasiert (Regel)
S2	Regelgüte Lüftungsanlage	Zulufttemperatur der Lüftungsanlage kann nicht stabil geregelt werden. Es kommt zur Wechselwirkung zwischen Heiz- und Kühlregister. Besonders Problematisch bei Lüftungsanlagen, wenn durch Schwingung der Frostschutz ausgelöst wird	signalbasiert (Regel)
S3	Schwingende Mischkreise	Regelparameter stimmen nicht und/oder Totzeiten sind zu groß, dadurch kommt es zum Über- bzw. Unterschwingen der Solltemperatur	signalbasiert (Regel)

Einstellung lokaler Komponenten - signalbasierte und modellbasierte Ansätze

Bei Komponenten, die nicht über eine zentrale Steuerung oder Regelung beeinflussbar sind, kommt es zu Fehlfunktionen, beispielsweise durch Maßnahmen bei Reparaturen und Wartungen. Die Auswirkungen entsprechend häufig denen der Komponentendefekte. Analog zum Erkennen von Defekten ist für diese Fehlerkategorie neben expertenwissenbasierten Regeln eine modellbasierte Fehlererkennung zielführend, welche die Betriebsdaten auf Abweichung vom erwarteten Nominalverhalten prüft.

Tabelle B-7: Fehler der Kategorie *Einstellung lokaler Komponenten*

	Bezeichnung	Beschreibung / Beispiel	Prüfart
L1	Konfiguration Brenner	Durch falsche Einstellung wird das Reglersignal nicht mehr umgesetzt, es erfolgt keine korrekte Leistungsregelung	modellbasiert
L2	Kesseltemperaturwächter	Durch eine zu niedrig eingestellte maximale Kesseltemperatur wird der Kessel zu früh abgeschaltet. Kein stabiler Betrieb	signalbasiert (Regel), modellbasiert

	Bezeichnung	Beschreibung / Beispiel	Prüfart
L3	Pumpen im Dauerbetrieb	Pumpen werden im manuellen Modus durchgehend betrieben	signalbasiert (Regel)
L4	Pumpen manuell auf falscher Leistungsstufe (siehe auch Fehler H5)	Zu hohe oder zu niedrige Pumpenleistung. Es kommt zu Strömungsgeräuschen oder Unterversorgung von Bereichen	signalbasiert (Regel)
L5	Manuell betätigte Absperrventile oder Bypässe (siehe auch Fehler K7)	Absperrventile / Bypässe werden bei Wartungsarbeiten geschlossen / geöffnet und nach Abschluss der Arbeiten nicht wieder in den Ursprungszustand versetzt	signalbasiert (Regel), modellbasiert
L6	Ventilstellung Mischventile (siehe auch Fehler K7)	Ventile im Handbetrieb auf einer Stellung fixiert	signalbasiert (Regel)
L7	Deaktivierte Sensorik	Durch Nutzer deaktivierte / manipulierte Sensorik wie z. B. Fensterkontakte oder Temperatursensoren	Expertenwissen
L8	Brandschutzklappen ausgelöst	Lüftung außer Betrieb, da Brandschutzklappen im Zuge von Wartungen ausgelöst und nicht wieder geöffnet wurden	signalbasiert (Regel)
L9	Zirkulationspumpe Warmwasser manuell auf falscher Leistungsstufe	Zu hohe oder zu niedrige Pumpenleistung eingestellt. Temperaturspreizung von Warmwasservorlauf- und rücklauftemperatur zu niedrig bzw. hoch.	signalbasiert (Regel)

Zugestellte Verbraucher - Redundanz und modellbasierte Ansätze

Durch Zustellen der Heizflächen oder der Zu- bzw. Abluftöffnungen mit Möbeln o.Ä. wird eine ausreichende Wärmeübertragung in Räume behindert. Mangelhafte Wärme- oder Kälteübertragung an den Raum kann über den Vergleich mehrerer, in ihrem Aufbau vergleichbaren Räumen erkannt werden. Bei zugestellten Wärmeverbrauchern wird die Wärmeübergabe an den Raum träger, bei zugestellten Lüftungsöffnungen die Luftqualität schlechter. Bei einer ausreichenden Anzahl vergleichbarer Räume ist das Vorgehen modellbasiert automatisierbar.

Tabelle B-8: Fehler der Kategorie *Zugestellte Verbraucher*

	Bezeichnung	Beschreibung / Beispiel	Prüfart
Z1	Zugestellte Heizkörper		signalbasiert (Regel), modellbasiert

	Bezeichnung	Beschreibung / Beispiel	Prüfart
Z2	Zugestellte Lüftungseinlässe oder Lüftungsauslässe		signalbasiert (Regel), modellbasiert

Planung / Ausführung - Expertenwissen

Während der Planungs- und Bauphase oder bei Umbauten kommt es häufig zu Fehlern. Hydraulikschemaschemata werden falsch geplant, Komponenten falsch dimensioniert oder Pläne nicht richtig umgesetzt. Fehler in der Planung können von Experten oder mit expertenwissenbasierten Regeln erkannt werden, wenn sie erkennbaren Auswirkungen auf den Betrieb von Komponenten haben. Fehler in der Ausführung können erkannt werden, wenn die Planungsunterlagen ausreichend Information über den beabsichtigten Betrieb beinhalten. Der Abgleich von Planung und Betrieb kann von Experten oder durch von Experten definierten Regeln überprüft werden. Grey-box Modelle können definiert werden. Allerdings ist aufgrund der Individualität dieser Fehler eine automatisierte Erkennung von Planungs- und Ausführungsfehlern nicht Ziel dieser Arbeit. Es wird davon ausgegangen, dass eine einregulierte Anlage vorliegt, in der diese Fehler behoben wurden.

Tabelle B-9: Fehler der Kategorie *Planung / Ausführung*

	Bezeichnung	Beschreibung / Beispiel	Prüfart
P1	Dimensionierung von Komponenten	z. B. Wärmeerzeuger zu groß oder zu klein gewählt	Expertenwissen
P2	Falsch gewählte Zonen	Räume mit zu unterschiedlicher Charakteristik werden in eine Zone gesetzt	Expertenwissen
P3	Fehlerhaftes Hydraulikschema	z. B. Kurzschlüsse	Expertenwissen, signalbasiert (Regel)
P4	Ungeeignete Komponenten gewählt	z. B. Raumthermostate, die nur den Heizfall abdecken, in Zonen mit Kühlung verbaut	Expertenwissen
P5	Regelstrategien von Lüftungsanlagen nicht bedarfsgerecht	Leistung der Lüftungsanlage nicht nach Luftqualität oder CO ₂ -Belastung geregelt	Expertenwissen
P6	Vertragswassermenge der Fernwärme	Zu groß (dadurch zu hohe Kosten) oder zu klein (Unterversorgung) gewählt	Expertenwissen
P7	Sensoren falsch gesetzt	z. B. Raumfühler mit Sonneneinfluss oder auf schlecht gedämmten Außenwänden. Außentemperaturfühler an ungeeigneter Stelle	Expertenwissen

	Bezeichnung	Beschreibung / Beispiel	Prüfart
P8	Planung wird falsch umgesetzt	z. B. Rohre vertauscht oder Hydraulik anders als geplant umgesetzt	Expertenwissen
P9	Anti-Blockierschaltungen	Keine Anti-Blockierschaltungen programmiert, Komponenten erleiden Standschäden	signalbasiert (Regel)
P10	Falsche Verknüpfungen, falsche Ein- oder Ausgangsgrößen der Regler	Datenpunkte werden falsch zugeordnet	Expertenwissen
P11	Nachrüstung von Teilsystemen	Nachträglicher Einbau von fehlerhaften Komponenten oder fehlerhafte Einbindung (z. B. hydraulisch nicht abgeglichen)	Expertenwissen, ggf. signalbasiert (Regel, Tensorfaktor, Erwartungswert), ggf. modellbasiert

Daten - signalbasierte Ansätze

Es gibt Ausfälle und Probleme bei der Datenerfassung und -übertragung bzw. -weiterverarbeitung. In einer Dateneingangskontrolle können die Daten automatisch auf Vollständigkeit und Grenzwerte geprüft werden. Datenpunkte, für die mehr als ein Wert pro Tag erwartet wird, wie z. B. die Außentemperatur, können auf Veränderung geprüft werden und es wird eine Meldung erzeugt, wenn sie konstant geblieben sind, z. B. bei Sensorausfall oder Störungen der Datenerfassung. Werte, die konstant bleiben sollen, wie z. B. Solltemperaturen oder Störmeldungen, können auf Veränderung geprüft werden, d.h. es erfolgt eine Meldung bei Änderung des Wertes.

Tabelle B-10: Fehler der Kategorie *Daten*

	Bezeichnung	Beschreibung / Beispiel	Prüfart
D1	Sensordefekte	Ausgefallene Messpunkte oder nicht plausible Werte	Expertenwissen, signalbasiert (Dateneingangskontrolle)
D2	Sensoren werden nicht aufeinander abgeglichen	Für viele Betrachtungen ist der Differenzwert zweier Messpunkte von Bedeutung, z. B. bei Differenzdrücken oder der Berechnung von Wärmeleistungen. Die zusammengehörenden Sensoren (in den Beispielen die Druck- oder Temperatursensoren) müssen aufeinander abgeglichen sein. Bei Drucksensoren muss ggf. eine unterschiedliche Höhe beachtet werden	Expertenwissen

	Bezeichnung	Beschreibung / Beispiel	Prüfart
D3	Sensoren an falscher Stelle verbaut	Fehlerhafte Position im Rohr, Raum etc.	Expertenwissen
D4	Uhrzeit stimmt nicht	Eingestellte und aufgezeichnete Uhrzeit in der GLT stimmt nicht mit der tatsächlichen überein. Dadurch kommt es zu Abweichungen bei Zeitprogrammen	modellbasiert, Vergleich mit berechneten Sonnenstand
D5	Zeitzone nicht in Zeitstempel enthalten	Umstellung zwischen Sommer- und Winterzeit nicht eindeutig	signalbasiert (Tensorfaktoren)
D6	Datenpunkte sind falsch bezeichnet bzw. falsch zugeordnet	In GLT oder der weiteren Verarbeitung	Expertenwissen
D7	Trenddaten werden nicht aufgezeichnet	Daten werden nicht an GLT übermittelt oder dort nicht gespeichert	signalbasiert (Dateneingangskontrolle)
D8	Umrechnungsfaktoren sind falsch	z. B. bei Strom- oder Wärmemengenzählern	Expertenwissen
D9	Auflösung nicht angemessen	Datenqualität nicht ausreichend. Sowohl Zeitauflösung als auch ereignisbasiertes Raster können zu grob sein.	Expertenwissen
D10	Leitrechner zu langsam oder zeitweiser Ausfall	Daten werden nicht mehr zuverlässig aufgezeichnet	Expertenwissen
D11	Rechnerdefekt	Keine Datenaufzeichnung	signalbasiert (Dateneingangskontrolle)
D12	Abbruch der Datenverbindung	Keine Datenübertragung möglich	signalbasiert (Dateneingangskontrolle)